

大型浮体式津波シェルターにおける重心位置と耐津波特性の関係

著者	岩瀬 彩香
学位名	修士(工学)
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2020
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001984/

修 士 論 文

大型浮体式津波シェルターにおける重心位置と 耐津波特性の関係

令和 2 年度
(2020 年 9 月)

海洋科学技術研究科 海運ロジスティクス専攻

岩瀬 彩香

修 士 論 文

大型浮体式津波シェルターにおける重心位置と 耐津波特性の関係

令和 2 年度
(2020 年 9 月)

海洋科学技術研究科 海運ロジスティクス専攻

岩瀬 彩香

目次

目次

図表一覧

第 1 章	序論.....	2
1-1	はじめに.....	2
1-2	目的.....	6
1-3	大型浮体式津波シェルターに求める条件	7
1-4	モデル地域選定	8
1-5	形状の検討	11
1-6	施設の受け入れ能力の決定	18
第 2 章	設計手法.....	20
2-1	大型浮体式津波シェルターの設計手法の検討	20
2-1-1	津波に対しての設計	20
2-1-2	地震に対する設計	22
2-1-3	浮体としての設計	23
2-2	設計した浮体	26
2-3	MPS 用簡易モデル作成.....	28
第 3 章	数値シミュレーション概要.....	32
3-1	MPS 法の概要.....	32
3-2	使用した波	32
3-3	水管の有効性を確かめる数値シミュレーションの計算条件	34
3-4	重心の変化による耐津波特性への影響を確かめる数値シミュレーションの計算条件 ..	35
第 4 章	結果と考察	37
4-1	水管の有効性	37
4-2	重心の変化による耐津波特性への影響.....	44

4-2-1	重心の変化による浮体傾斜への影響.....	53
4-2-2	重心位置と浮体高度の関係.....	60
第 5 章	結論と今後の課題.....	65

謝辞

参考文献

図表一覧

Fig. 1-1 Percentage of deaths caused by the Great East Japan Earthquake.....	2
Fig. 1-2 Percentage of deaths by age in the Great East Japan Earthquake.....	3
Fig. 1-3 Shirahama Town Population Composition	8
Fig. 1-4 Shirahama Town Tonda Area.....	8
Fig. 1-5 Tonda area hazard map.....	9
Fig. 2-1 Tsunami evacuation building design method	20
Fig. 2-2 Floating body design method	25
Fig. 2-3 Overhead view.....	26
Fig. 2-4 Overhead view cross section	26
Fig. 2-5 Waterway.....	27
Fig. 2-6 Relationship between center of gravity and buoyancy	28
Fig. 2-7 Case 1.....	28
Fig. 2-8 Case 2.....	29
Fig. 2-9 Relationship between particle size and number of particles.....	29
Fig. 2-10 Detailed model (building).....	30
Fig. 2-11 Simple model (building).....	30
Fig. 2-12 Mesh model (building).....	31
Fig. 2-13 Point cloud model (building)	31
Fig. 3-1 Wave height.....	32
Fig. 3-2 Wave height measurement point.....	33
Fig. 3-3 Floating body plan	34
Fig. 3-4 Waterway plan1	34
Fig. 3-5 Waterway plan2	35
Fig. 3-6 Floating body plan view (convex type)	35
Fig. 4-1 Relationship between spout width and float angle	37
Fig. 4-2 Relationship between spout width and float angle	38
Fig. 4-3 Motion of a float (WIDTH_0)	39
Fig. 4-5 Motion of a float (WIDTH_050)	40
Fig. 4-6 Motion of a float (WIDTH_076)	41
Fig. 4-7 Motion of a float (WIDTH_100)	42
Fig. 4-8 Motion of a float (WIDTH_126)	43
Fig. 4-9 Motion of a float (L_H)	44
Fig. 4-10 Motion of a float (L_M)	45
Fig. 4-11 Motion of a float (L_L)	46
Fig. 4-12 Motion of a float (M_H)	47
Fig. 4-13 Motion of a float (M_M).....	48
Fig. 4-14 Motion of a float (M_L).....	49

Fig. 4-15 Motion of a float (R_H)	50
Fig. 4-16 Motion of a float (R_M).....	51
Fig. 4-17 Motion of a float (R_L).....	52
Fig. 4-18 Relationship between center of gravity and float inclination (high position)	53
Fig. 4-19 Relationship between center of gravity and float inclination (middle position)	54
Fig. 4-20 Relationship between center of gravity and float inclination (low position).....	55
Fig. 4-21 Relationship between center of gravity and float inclination (left position).....	56
Fig. 4-22 Relationship between center of gravity and float inclination (center position)	57
Fig. 4-23 Relationship between center of gravity and float inclination (right position)	58
Fig. 4-24 Relationship between center of gravity and floating body angle	59
Fig. 4-25 Relationship between center of gravity and height of floating body (high position)	60
Fig. 4-26 Relationship between center of gravity and height of floating body (middle position).....	60
Fig. 4-27 Relationship between center of gravity and height of floating body (low position)	61
Fig. 4-28 Relationship between center of gravity and height of floating body (left position)	63
Fig. 4-29 Relationship between center of gravity and height of floating body (center position)	63
Fig. 4-30 Relationship between center of gravity and height of floating body (right position)	64

Table 1 Examination of floating body shape.....	11
Table 2 Examination of mooring method.....	13
Table 3 Examination of the ground shape.....	15
Table 4 Structural design study	16
Table 5 Shapes handled in this research	17
Table 6 Facility capacity	18
Table 7 Terminology for design methods such as tsunami evacuation buildings.....	21
Table 8 Seismic standard	22
Table 9 Floating body design method terminology	23
Table 10 Floating body specifications	27
Table 11 Particle density 1.....	36
Table 12 Floating body mass 1.....	36
Table 13 Case name.....	36
Table 14 Center of gravity and maximum angle.....	59
Table 15 Maximum floating height and final floating height (high position).....	61
Table 16 Maximum float height and final float resistance (middle position)	61
Table 17 Maximum float height and final float resistance (low position)	62

第1章 序論

1-1 はじめに

津波という言葉が世界で使われ始めたのは 1940 年代後半のことである。ハワイ諸島への津波被害がきっかけだ [1]。もちろんそれまで日本以外に津波がなかったわけではない。一方で、「地震による大きな波」を示す言葉が一般に広く知られていなかったのも推測できる。日本に「津波」という言葉があったということは、多くの民衆がその現象をとらえ、防災に努める下地があったということだろう。津波対策の転換期として、近年では 1960 年のチリ地震が挙げられる。チリ地震以降、過去の経験に基づく対策に加えて科学技術による対策が取られるようになったのだ。

しかし、2011 年 3 月 11 日、東日本大震災に伴う東北地方太平洋沖地震津波では多くの被害を出すことになった。Fig. 1-1 に示す通り、特に津波による被害が顕著だ。警察庁のまとめでは 2020 年 3 月 10 日時点で死者は 15899 人、行方不明者は 2529 人、負傷者は 6157 人に上る [2]。これに加え、復興庁によれば、2020 年 2 月 10 日の時点で未だ約 48000 人の避難者がいる [3]。災害そのものから生還しても、その後の避難生活の中で体調を崩したことなどが理由の震災関連死も令和 9 年 30 日時点で 3739 人となった [4]。

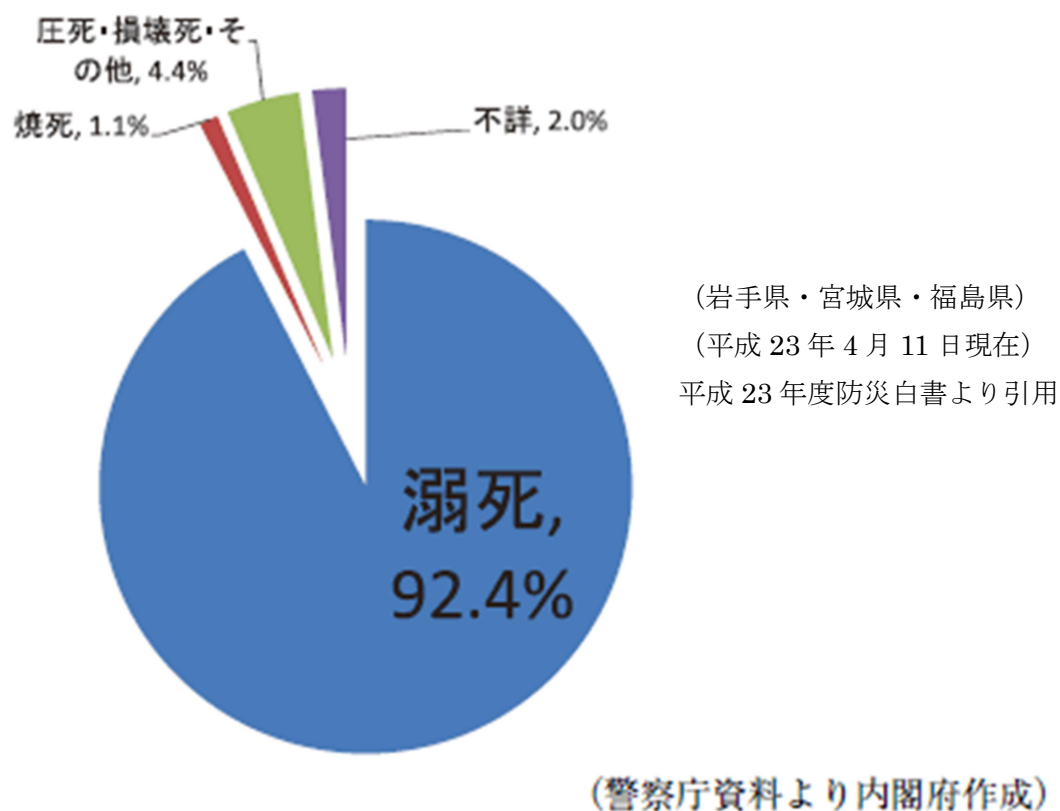


Fig. 1-1 Percentage of deaths caused by the Great East Japan Earthquake

東日本大震災における被害状況を分析すると、いくつかの特徴を見つけることができる。まず被害者の年齢別割合から、高齢者の被害が多いことが分かる。Fig. 1 2 は平成 23 年度の防災白書より引用した [5]。岩手県、宮城県、福島県の年齢別死者数は 60 歳以上が 65% と過半数を占めている。高齢者が逃げ遅れた理由として、移動速度が遅いことや寝たきり、もしくは車いすなど移動が不自由なケースが多いことが挙げられる。一刻も早く移動して高所に逃げるのが肝要とされる津波からの避難では、自力移動や階段・坂道を上ることが難しい人が取り残されがちである。

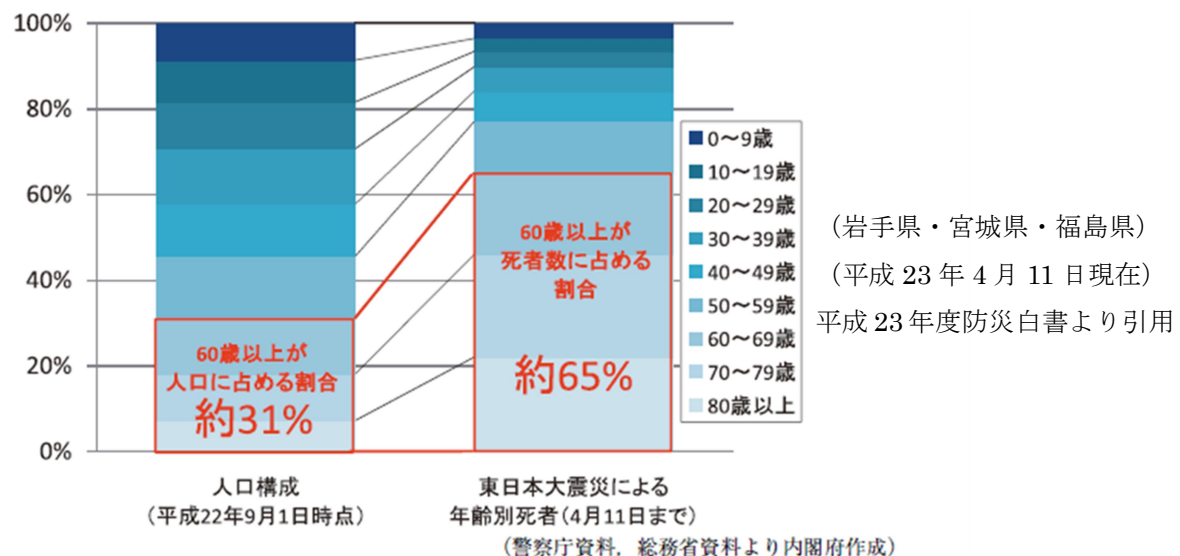


Fig. 1-2 Percentage of deaths by age in the Great East Japan Earthquake

次に、震災関連死の多さだ。震災関連死とは災害から逃れつつも避難生活の中で体調を崩すなどして亡くなることを示す。体調を崩して死に至る人の多さを見れば、死に至らないまでも苦しんだ人は多くいたと考えられる。これらの原因として、生活環境の著しい悪化が挙げられる。震災直後では流されてきた缶詰を食料とせざるを得ない、清潔な水を確保できない、燃料の枯渇などが発生した [6]。

また、使用できる医療設備の不足も死者の増加に関わっていると推測できる。

死者数以外に、被災地域である三陸地方には過去繰り返し津波に襲われてきたという特徴がある。東日本大震災は千年に一度の津波と呼ばれたが、千年前までさかのぼらずとも甚大な被害を記録した津波はチリ地震や明治三陸沖津波など枚挙にいとまがない。特に明治三陸沖津波は死者 21, 953 名、流出家屋 10, 370 棟を記録した [7]。また、東日本大震災の被災地域にも含まれている。もちろんその間に災害対策に進歩がなかったわけではない。技術の進歩により家屋の倒壊は減少しただろうし、医療の発達により救える命も増えただろう。阪神淡路大震災以降は建築基準も大きく見直された。しかし、明治三陸沖津波の次に発生した大きな津波災害である昭和三陸沖津波でも、死者 1, 823 名、行方不明 1, 140 名、流出倒壊 6, 837 戸という被害を受けている。明治三陸津波に対しとられた大きな対策として、居住地の高台移転がある。東日本大震災でも復興時に高台移転するケースが散見される。結論から言えば、一度移転を試みた集落も元の土地に

戻ってしまい昭和三陸沖津波で被災するケースが確認された。この理由について『三陸地方の津波に依る聚落移動』[8]で次のように述べられている。

- (1) 漁業を生業とする者の居住地から海浜までの距離が遠すぎたこと
- (2) 高地移転で飲料水が不足したこと
- (3) 交通路が不便であったこと
- (4) 主集落が原地にあり、それと離れて生活する際の不便や集落心理
- (5) 先祖伝来の土地に対する執着心
- (6) 津波襲来が頻繁でないこと（約 10 年たったところからの復帰が目立つ）
- (7) 大漁が景気となり浜の仮小屋を本宅とするようになったこと
- (8) 大規模火災が発生し、集落が消失してしまったこと（唐丹村）
- (9) 納屋集落が漸次的な定住家屋へと発達したこと
- (10) 津波未経験者が移住してきたこと

明治 29 年から昭和 8 年にかけてあった出来事であるため、現在では(2)は技術的に解決できるだろう。しかしそのほかの事項は現在でも変わらない状況であると考ええる。海岸地域では漁業が大切な生業であるし、その仕事場と生活の場が離れているのは不便である。(8)は移転後の集落に災害が発生したことをきっかけに原地復帰したケースだ。そして(10)は現在東北の地で進みつつあると言って良いだろう。どれだけ土地に経験があろうとも、人が入れ替わってしまうとその経験を引き継ぐことが困難になるのだ。これは同時に、長く津波被害を受けていない沿岸地域の津波対策が困難であることを示している。

現代の津波対策の限界として例を挙げるならば、田老町の防潮堤の例がある。田老町は明治三陸沖津波、昭和三陸沖津波の教訓から、高さ 10m の防潮堤を築いた。しかし東日本大震災に際して実際に田老町を襲ったのは、防波堤の高さを優に超える約 15m の津波であった。津波の高さが想定をはるかに上回っていたことに加え、防潮堤があること自体が油断を招き、避難が遅れたという指摘もある。私たちは自身や津波がいつ発生するかを予測することができない。千年に一度の大津波のために 20m、30m の壁を築くことは現実的ではないし、日本の海岸線すべてにそんな壁を築くことはできない。防波堤のみに頼った津波対策は目指すべきではないと考えられる。

津波災害を乗り越えるために必要な対策は、まだ十分ではない。防波堤は万全ではなく、根本的解決策であると思われた高地移転も失敗を重ねている。どれだけ避難訓練を重ねても、逃げられない人はいる。このような背景を受けて今進められているのがソフト対策とハード対策の融合である[9]。防波堤やシェルターといった構造物での対策がハード対策、避難訓練やハザードマップの作製などがソフト対策に当たる。ハード対策とソフト対策の融合を考えるときには、一緒に津波レベルの概念を考える必要がある。

津波は以下のようにレベル分けされている。

・津波レベル 1 海岸性の津波防護レベル。数十年から百数十年に一度の津波を対象とし、人命及び資産を守る。

・津波レベル 2 地域の津波減災レベル。レベル 1 をはるかに上回り、構造物対策の適用限界を超過する津波に対して、人命を守るために必要な最大限の措置を行うレベル。発生頻度が 500 年から 1000 年に一度の巨大津波を考える。

端的に言えば、津波レベル 1 はシェルターや堤防といった構造物で防ぐ津波。津波レベル 2 は、構造物の限界を超えた津波である。この時、構造物は人命を守るためにできるだけ被害を減らす目的を持っている。つまり、レベル 1 はハード対策で目指す水準、レベル 2 はハード対策とソフト対策を組み合わせで目指す水準となっている。

レベル 1 対策には、防波堤や防潮堤といった既存の構造物が有効である。しかし、レベル 2 津波が襲ってきたときに避難しにくい人たちをカバーできる対策に乏しいのが現状である。身体を自由に動かせるのであれば、防波堤が津波到着を遅らせている間に津波避難ビル等の高所に避難することも可能である。しかし、一人では動けない人が取り残された時、いくら津波の到着を遅らせても避難する方法がない。現状では自由に動ける人が声掛けや手助けを行って避難すること呼びかけるケースが見られるが、避難誘導中に津波にのまれた例も存在する [6]。

1-2 目的

いつ大型の地震が起きてもおかしくないこの国で、抜本的な津波対策の見直しは急務である。国や自治体は新たな指針を作るなどして津波に対する安全基準等を大きく見直し、研究者たちは現象の解明とより確実で適切な避難方法や防災施設の研究を行っている。本研究が提案する浮体式大型津波シェルターもその一端である。先行研究を参考に、東北地方太平洋沖地震津波の被害状況から浮上して津波を回避する構造物を新たに設計する。

先に述べた背景から、

- ・自力移動が困難でもレベル 2 津波から避難できる
- ・震災関連死を防ぐ住環境・医療環境が整っている
- ・高地移転など民衆の生活になじまないものは避ける

これを満たす施設の設計を行う。

現在医療浮体をはじめとして、浮体を利用した避難施設が検討されている [10]。陸上設置型の津波避難施設についても先行研究で可能であることが示された [11] [12] [13]。さらに先行研究では数値シミュレーションを用いた設計手法が適用可能であることも示されている。これを受け、本研究ではさらに踏み込んだ具体的な浮体形状の提案を目指す。先行研究では、洗堀に円柱形状の浮体建築物と直方体の浮体建築物を設置した簡易な形状であった。これを係留柱・浮体形状・地盤形状の 3 つの部位に分け、目的を満たす形状を検討する。加えて搭載する重量物の配置や浮上安定性についても考え、数値シミュレーションで設計が妥当であることを確かめる。

1-3 大型浮体式津波シェルターに求める条件

まず、津波防災地域づくり法における指定避難施設の要件 [14]について以下の要件が示されている。

1. 構造上の要件（津波に対し安全な構造方法等とすること。）
2. 避難上の要件（避難上有効な場所の配置，かつ，当該場所までの経路の確保。）
3. 管理上の要件（津波発生時に住民に開放されること等。）

津波に対しては、構造物で防御するハード対策だけではなく、日頃からの防災訓練や迅速な避難といったソフト対策も併せて行うことが重要である。そしてレベル 2 の津波被害を想定したとき、迅速に安定した避難生活を開始できることが震災関連死を防ぐことにつながると考えた。これらを踏まえ、下の要件を定義した。

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">① 十分な耐震性を持ち、浮体として安定して機能すること② 避難がしやすい形状であること③ 普段から住民が親しめる施設であること④ 避難しにくい住民の多くがあらかじめ施設内にいられること⑤ 孤立無援の状態でも 1 週間安定した避難生活を送れるようにすること⑥ 被災後迅速に避難生活を開始できること⑦ 医療を提供できる体制があること |
|--|

まず避難施設として十分な強度を確保することから①を設定した。同じく避難施設として②は欠かせない要件である。③はソフト対策に関連する。対策を講じてもそれが浸透しなければ意味がない。普段から身近な施設として運用することで住民に親しみを持ってもらい、有事の際に迅速な避難を促す狙いだ。④は障がい者や年配者など、自力での避難が困難な人が日常的に利用する施設を建物に設置し、災害発生時にその場にいながら避難が完了する状況を目指す要件である。⑤⑥⑦は災害後の生活に関連した項目である。レベル 2 の津波を想定したとき、通常の耐津波設備がない建物の多くは被害を受けることが予想される。その際に多数の避難者が発生するが、避難者に対して素早く安定した衣食住を提供することで、二次被害や震災関連死の防止を狙う。

1-4 モデル地域選定

モデル地域として和歌山県西牟婁郡白浜町を選択した。白浜町の面積は 200.98km²，人口は令和 2 年 6 月末現在 21035 人である。Fig. 1 3 に示しているのは 2015 年の国勢調査 [15]から作成した年齢別人口構成だ。60 歳以上が 44%と高い比率で，高齢化が進んでいる地域である。

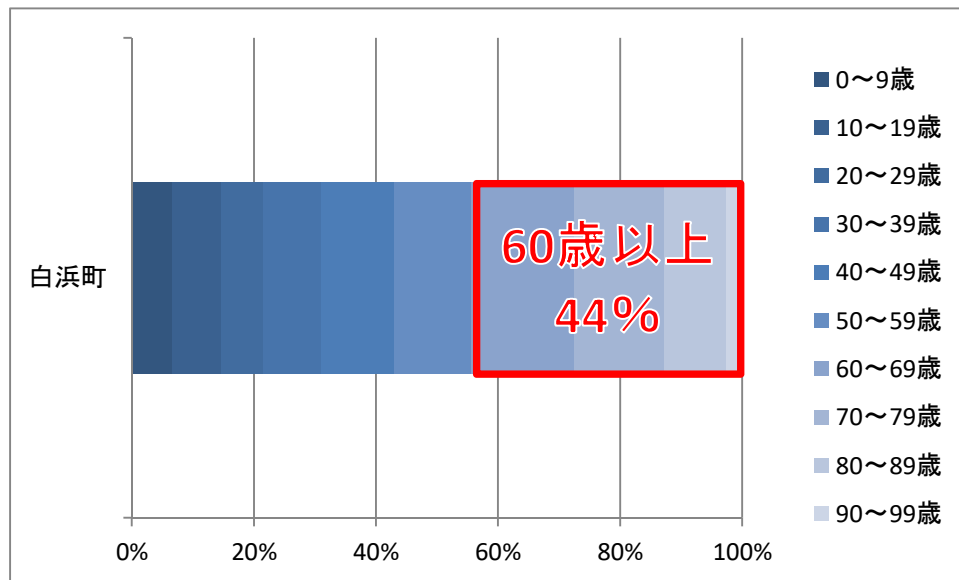


Fig. 1-3 Shirahama Town Population Composition

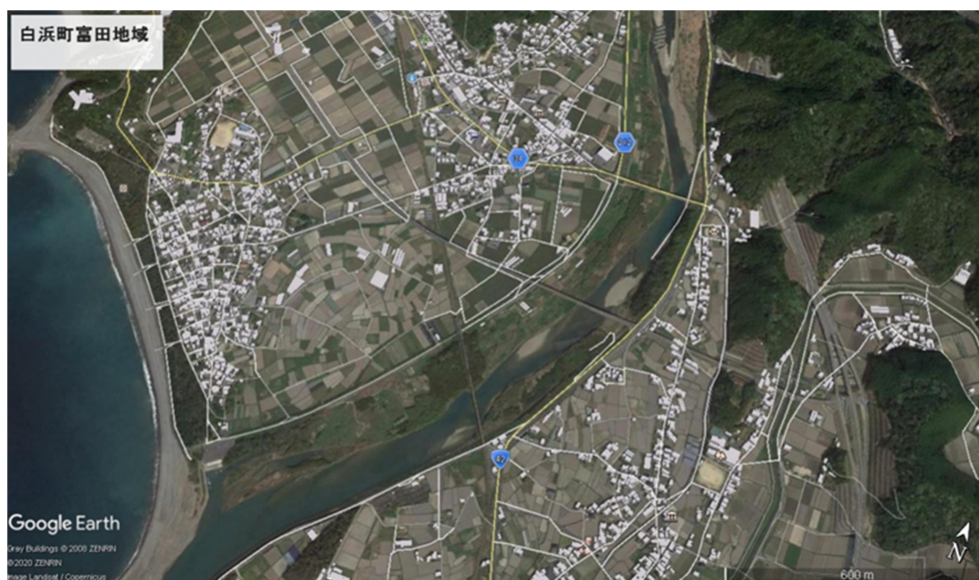


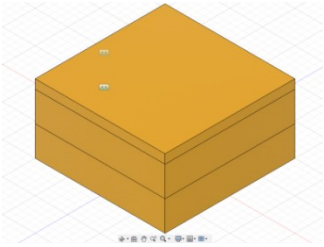
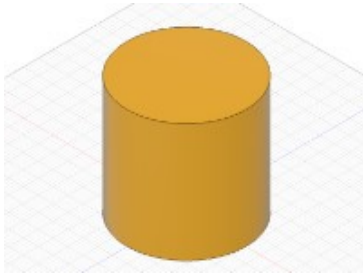
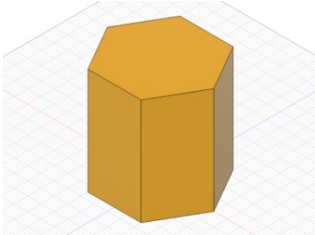
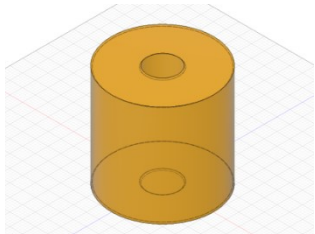
Fig. 1-4 Shirahama Town Tonda Area

本研究ではこの白浜町を流れる富田川流域 (Fig. 1 4) に着目した。富田地域のハザードマップを Fig. 1 5 に示す [16]。浸水高は 3~5m ほどであるものの、広範囲にわたって浸水する想定であることが分かる。これは富田川による影響だと考えられる。この地域は山に囲まれており、権現平という高台もあることから津波避難場所は確保されているように見えるが、実際には平野部が大きく広がっており高台に上りきるまでに津波が到達する恐れがあることや、浸水地域に設置されている津波避難ビルが少ないこと、その津波避難ビルも高さが 6. 6m しかないことが問題として挙げられている [17]。また、避難所として指定されている小学校は浸水域にあり、津波襲来の際には避難所として機能できるまでに時間がかかることも考えられる。この地域は川と海岸に接しているため、複数の方向から津波に襲われることも考えられる。車両での避難も考え、シンボルとなりうる高さを持ち、長期間暮らせる避難施設を目指す。

1-5 形状の検討

浮体の形状は Table 1 の通り以下を検討する。

Table 1 Examination of floating body shape

	浮体形状	形状の特徴
角型		<ul style="list-style-type: none"> ・設計が容易 ・波を受ける位置によって挙動が変化する ・波を受ける面積が大 ・係留柱との接触面積を確保しやすい
円柱型		<ul style="list-style-type: none"> ・波を受け流す性能に優れる ・L/B を変化させたいときに設計が煩雑 ・係留柱との接触面積を確保しにくい ・L/B が 1 に近ければ波の方向による挙動の変化が小さい
六角型		<ul style="list-style-type: none"> ・波を受け流す性能も期待できる ・係留柱との接触面積を広くとれる ・耐震性や復原性の評価が煩雑
円筒型		<ul style="list-style-type: none"> ・中央に係留柱を置くことで採光性に優れる ・波を受け流す性能に優れる ・単体型浮体には適さない

浮体について、浮体として利用する部分と居住区域として利用する部分を一体とした形状（一体型建物浮体）の他、浮体部分と建物部分を別に設計して組み合わせる形状（単体型浮体）も対象とした。浮体部分と建物部分を一体とする形状は先行研究で検討されており、浮上性能が実証

されている。しかし、いくつかのデメリットも存在した。まず、建物形状が限られる点だ。復原性や積載性を確保しながら浮力を確保しようとする、おのずと形状が定まる。これは多くの船舶の形状が似通っていることから明白だ。建物形状が限られてしまうことで、利用可能な施設が限られることが予想できる。これは普段から施設を使用してもらい地域になじませるという目的を達成できない恐れがあると判断した。さらに、避難する人から見たとき、浮上しているのは建物のみである。避難時、建物入口に人が殺到することで2次災害が発生する恐れが生じる。また、一体型建物浮体では、施設利用されている階層に津波が衝突する可能性がある。窓ガラス等に津波を耐える強度を与えることは現実的ではなく、津波襲来時には低層階の利用が不可能になるだろう。利用が不可能になるだけならまだしも、人的被害が発生する可能性も考えられる。

こうした問題点を受けて考案したのが浮体機能と建物機能を切り離した構造だ。浮体機能部分を地面に埋め込む形で設置し、平時は建物機能部分のみが地上で利用される。一般に、津波は地上を進む際に速度が遅くなる。これを利用して地中に津波を迅速に導入するための水路を設置し、地上で津波が建物部分に到達するよりも早く地下を津波で満たして建物を浮上させる狙いだ。浮体部分の上ならば一体型に比べ建物の設計について自由度が高く、地域が必要としている施設を建設できる。また、浮体部分が上昇するため避難するために建物に入る必要がない。津波が衝突する部分も浮体部分であり、人的被害を避けられる。もう一つの利点として、浮体部分に根差した耐震機能を建物に持たせることができる。まず前提として、浮体型津波シェルターでは地面に根差す形で耐震機能を持たせることができない。したがって、堀に浮かべて地震の影響を避けるか、地面との摩擦やつめといった構造の工夫を凝らす必要がある。さて、こうした構造上の工夫で耐震性を確保する時、一体型建物浮体では構造を設置できる場所が一か所になる。対して単体型浮体では、地面と浮体、さらに浮体と建物の間に設置することができる。もちろん堀に浮かべていれば地震の影響は受けないが、その場合浮体部分へ移動するために橋を渡らなくてはならない。橋によって移動経路が限られてしまうことは、避難の困難さにつながると考えられる。

次に形状の解説をする。まず角型について述べる。角型は多くの建物で用いられている基本的な形状であり、他の形状に比べ設計も容易であると考えられる。津波を受ける面積が広く動揺が大きくなる反面、係留柱との接触面積を広くとることができる。接触面積を広くとることにかかる圧力を低減することになり、構造物の破損を防ぐ。津波に対する構造物の角度で同様の様子に変化すると予想され、設計時には L/B の値を考慮する必要がある。

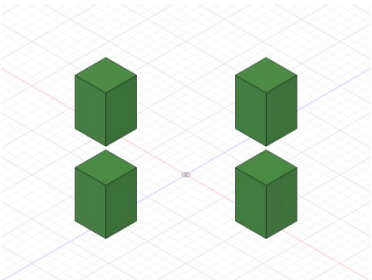
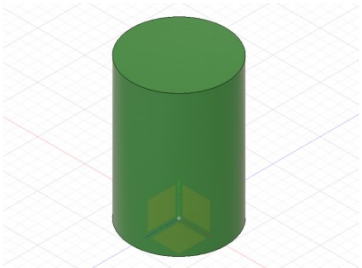
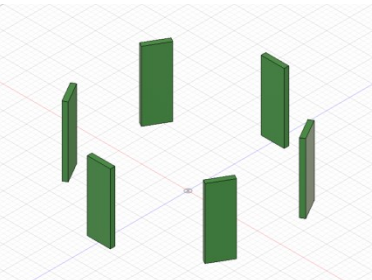
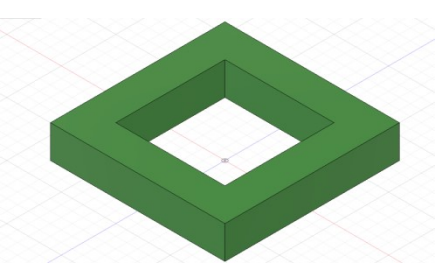
円柱型は津波を受け流す性能に優れることが先行研究で示されている。しかし、係留柱との接触面積を確保しにくい。津波によって浮体自体が回転してしまうケースも想定され、係留には工夫を要する。 $L/B=1$ の場合どの方向から津波を受けても同じ挙動を示すと予想され、有利な形状だ。ただし、建物内の空間利用に難が残る。

六角型は角型と円柱型の特性を併せ持った形状として考案した。平坦な側面を確保することで係留柱との接触面積を広く保つと共に、円柱に形状を近づけることで津波を受け流す能力を持たせることにした。

円筒型は中央に備えた1本の円柱を係留柱とした形状だ。建物部分が直接津波を受けることになる反面係留柱は津波を受けることがない。また、外部に係留柱を設ける場合に比べ採光性に優れ施設として利用しやすいと考えられる。

次に、Table 2 に示す通り係留方法について検討する。係留柱は浮体の流失を防ぐ機能を持ち、建物や浮体から受ける圧力・衝撃力に耐える必要がある。

Table 2 Examination of mooring method

角型		<ul style="list-style-type: none"> ・浮体及び建物浮体を囲むように角柱を設置する ・剛性に優れる
中央円柱型		<ul style="list-style-type: none"> ・円筒型建物浮体に対して設置 ・性能が波の方向に関わらない ・波圧の減少は期待できない
板型		<ul style="list-style-type: none"> ・浮体及び建物浮体を囲むように壁を設置する ・景観や採光性に優れる
囲い型		<ul style="list-style-type: none"> ・単体浮体型に用いる。高い剛性を発揮するが、対応できる津波高さは単体浮体の型深さに依存する。

角柱型は剛性の確保に優れていると考えられる。しかし係留柱に厚みがあるために、係留柱付近の浮体内部には外からの光が入りにくくなる。

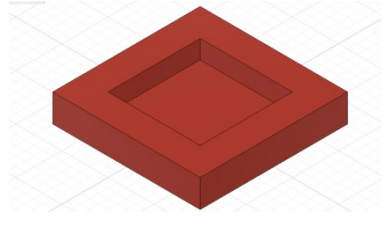
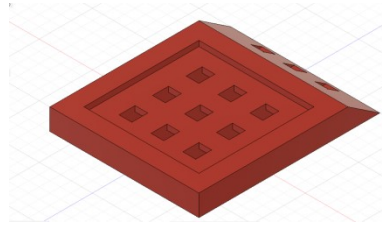
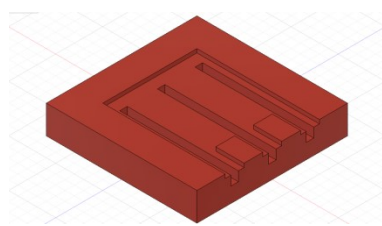
中央設置型は円筒形浮体の中央に設置する形状だ。円柱型であるため、方向に関わらず応力を受けられると考えられる。係留柱は津波を直接受けずに済むことや、建物の外観を損なわないこと、採光性に影響しないこともメリットに挙げられる。

板型は角柱型の最適化形状を目指したものだ。応力の分布から、接地面に近い部分が大きい曲げモーメントを受けることが予測されるため、三角形のリブを取り付けて接地面に近づくにつれ許容応力が増す形状にした。角柱型に比べ薄いため景観や採光性に優れると考えられる。

囲い型は単体浮体型に用いる形状だ。浮体に沿って囲むような穴を掘り、そこに浮体を埋め込む。図に例を示したように、地盤をそのまま係留柱と見立てている。したがって剛性は確保しやすく、浮体部分が接触するため建物部分との接触もない。一方で対応できる津波の高さは掘り込み深さに依存するため、対応波高を確保したい場合は角柱型等の別種の係留柱を併用する必要がある。

Table 3 に示した地面形状とは、浮体を設置する地面に加工を加えることで円滑な浮上を目的とした構造である。浮体をそのまま地面に設置すると、圧力差によってうまく浮体が浮上しない可能性も考えられる。これを解決するため、地面に水路や孔を掘り加工する。

Table 3 Examination of the ground shape

地面形状		建物や浮体から受ける圧力や衝撃力に耐える必要がある 安定した浮上のために地面を加工する。	【堀型】 ・堀に水を入れておくことで速やかに浮上する
			【水路型】 ・噴出孔から津波を導入し、上昇のための圧力として利用する
			【暗渠型】 ・暗渠に津波を導入することで、浮上の際の抵抗を減ずる

堀型は、堀に水を張って浮体を浮かべる方法だ。常に水に浮いている状態を保つため、地震の影響を受けにくい。一方で地震動の吸収が期待できる堀の広さにすると、橋を架けて浮体へ移動することになる。先述したように、避難の容易さに係る項目だ。

水圧利用型は地盤底の部分に津波導入用の孔を開け、津波が噴出する圧を利用して浮上の助けとすることを狙った形状である。津波発生時、海岸沿いに設置した津波導入孔から津波上陸に先んじて導入を開始、津波が建物に到達したときには浮上が完了する想定だ。噴出口からの水圧では速やかに浮上できない重量を持つ際は、側面にも津波導入孔を設けて水位を上昇させ、浮力発生の手助けとする。

暗渠型は浮体下に暗渠を形成し、津波を底に通すことで浮上の助けとする形状である。水圧利用型と異なり暗渠は貫通しているため、水圧による浮上効果はない。しかし、より安定した浮上が見込める。暗渠断面は T 字型をしており、流量を確保しながらも浮体底面と水面の接触が増える設計にした。

いくつかの浮体や係留柱の形状例を示したが、今回は設計目的に一致する形状について具体的な設計を行ってシミュレーションで実現可能かどうかを検討することにした。表に示した設計目的のうち、形状によって左右される項目は①②③だ。それ以外の項目については、具体的な設計の中で重量の条件等として検討される。検討結果を Table 4 に示した。

- ① 十分な耐震性を持ち、浮体として安定して機能すること
- ② 避難がしやすい形状であること
- ③ 普段から住民が親しめる施設であること
- ④ 避難しにくい住民の多くがあらかじめ施設内にいられること
- ⑤ 孤立無援の状態でも 1 週間安定した避難生活を送れるようにすること
- ⑥ 被災後迅速に避難生活を開始できること
- ⑦ 医療を提供できる体制があること

Table 4 Structural design study

		①	②	③
浮体構造	一体型建物浮体	○	△	○
	単体型浮体	◎	◎	◎
浮体形状	角柱型	○	—	○
	円柱型	◎	—	○
	六角型	◎	—	○
	円筒型	◎	—	◎
係留柱	角柱型	—	△	△
	中央円柱型	—	◎	◎
	板型	—	△	○
	囲い型	—	◎	◎
地面形状	堀型	◎	△	○
	水圧利用型	△	◎	○
	暗渠型	△	◎	○

まず「①十分な耐震性を持ち、浮体として安定して機能すること」について述べる。一体型建物浮体は耐震性について有利にはならないが、浮体としては十分に機能する。よって○とした。単体型浮体は地面と浮体、浮体と建物の二か所に耐震構造を作ることができるため、一体型建物浮体に比べ有利であるとして◎である。浮体形状は角柱型のみ○とした。耐震性については形状ごとの違いはないと考えたが、津波を受け流す性能は角柱型が劣る。設置については角度を考慮せねばならない。係留柱はそれぞれ十分な耐震性と耐津波性を持った設計をする前提であるため、検討外とした。地面形状は堀型が耐震性に特に優れるため◎である。水圧利用型と暗渠型につい

ては、耐震性について相応の工夫を要するため△とした。

次に「②避難がしやすい形状であること」について述べる。一体型建物浮体は外部から避難する際、直接建物内に避難する必要があるため入口での混雑が考えられるため△とした。単体型浮体はこの点で有利であるため◎である。浮体形状は避難のしやすさと関連がないと考え検討外となっている。係留柱について、角柱型は厚みの分だけ避難場所への距離が遠くなるため△、同様の理由で板型も△となっている。対して中央円柱型は係留柱が建物の内側に設置されるため、避難経路を短縮できる。囲い型は周囲の地面を係留柱に見立てているため、避難経路を短縮できる。したがって中央設置型と囲い型では◎とした。地面形状について、堀型のみ避難する際に橋を渡る必要が生じることから△となっている。

最後に「③普段から住民が親しめる施設であること」を検討する。ここでは建物の自由度や採光性等、施設利用がしやすい形状であるかどうかを検討した。浮体構造について、一体型建物浮体に比べ単体型浮体は、著しく浮心が偏らない範囲であれば建物の設計が自由であることから有利である。したがって◎とした。浮体形状は円筒型が外部に柱を持たない形状であるために◎となっている。他の形状は、係留柱や構造の条件に依存するため特に不利ではないという意味で○としている。係留柱について、角柱は厚みによって採光性や建物のデザイン性に制限が生じるため△となっている。中央円柱型は採光性に優れているため◎、囲い型も同様の理由で◎とした。板型は角柱型と似ているが、柱は薄い板条であるため建物の形状に沿わせたり採光窓を設けたりすることも可能である。よって評価を○とした。地面形状について、水圧利用型と暗渠型は連続した地面となる設計であるため特に不利になる条件はない。堀型のみ橋を渡る必要があるが、日本全国に堀を有する施設があることを考えれば、堀が特に不利となる条件であるとは考えにくい。よって○とした。

以上の検討を踏まえ、本研究では Table 5 の形状について具体的な設計を行うことにした。

Table 5 Shapes handled in this research

浮体構造	単体浮体型
浮体形状	角柱型
係留柱	囲い型
地面形状	堀型・水路型

地面形状は堀型で有利な部分と水路型で有利な部分が違っており、片方が苦手な部分を片方が補える関係にある。例えば、堀型で左右の地震動まで吸収しようとするとう堀が広がってしまい避難が困難になる。ここで堀型に囲い型の係留柱・単体浮体型を合わせて適用すると、狭く橋がない、単体浮体型の避難しやすさを活かした構造になる。しかし、常に浮いている状態では建物内部の重量変化で浮体が上下してしまう。これでは地面と浮体の間に高低差が生じてしまう。そこで、水位を着底状態が維持できる程度に保つことで堀をダンパーとして作用させ、地震動を吸収する設計とした。

1-6 施設の受け入れ能力の決定

大型浮体式津波シェルターの設計に入るために、施設の規模を定めておく必要がある。先行研究では施設のサイズを優先した設計を行ったが、本研究では必要な受け入れ能力を設定してそれを満たす設計を考える。能力を基準にして、形状の有利を比較検討するためだ。まず必要な資源の重量を算出し、それと建物の想定積載荷重を比較する。想定積載荷重のほうが上回っていれば実現可能であるとし、床上に設定した単位床面積当たり積載荷重を乗せた状態でシミュレーションを行う。

以下の Table 6 に求める能力を示す。

Table 6 Facility capacity

受け入れ人数	2000 人
孤立無援での運営日数	7 日
単位床面積当たりの積載荷重	2900N/m ²
一人当たり水使用量	300L/日
一週間当たり水使用量	42 × 10 ⁵ L
600kVA 常用発電機	10 台 (10t)
一時間当たり発電機使用燃料	2000L/h
一週間当たり発電機使用燃料	336 × 10 ³ L
一週間当たりガス用使用燃料	0. 16L/m ²
一人当たり占有床面積	7. 29m ²
延べ床面積	29160m ²
床上最大積載荷重	845640000N
資材重量	4540765kg
床上積載重量	9081531kg

まず受け入れ人数は暫定で 2000 人を設定した。孤立無援での運営日数は 7 日としたが、浮体という性質上パイプライン等でライフラインの供給を受けると設計上の工夫が必要になる。そこで施設内に貯蔵庫を作って最大 2 週間、最低でも 1 週間分の資材を確保することにした。したがって設計に用いるのは貯蔵量が最大である 2 週間分が確保されているときの重量を基に設計する。床当たりの積載荷重は国土交通省が示す建築構造設計基準の資料 [18]より、事務室、会議室及び食堂の設計に用いる数値から決定した。今回これはシェルターに持たせる強度の基準となる値ではなく、床当たりに乗せる重量として扱う。国土交通省の統計資料 [19]から一人当たり水使用量は 1 日 300L を想定している。ここには飲料水の他に風呂や洗濯に使用する水も含まれる。電力は一台あたり 10t の 600kVA 常用発電機を 10 台配置する。病院の単位床面積当たり平均電力消費量 54W を満たせるものとしてビルエネルギー総合管理技術協会の統計 [20]から算出した。これらをすべて稼働させると 1 時間当たり 2000L の燃料が必要である。これを 1 週間分として 336000L を電力分の燃料とする。ガス用の 1 週間当たり燃料油量は 0. 16L/m²。水・電気・ガスに必要な質量は 1 週間分でおおよそ 4540765kg となった。なおこの質量は密度を 1. 0kg/m³として

計算した．実際には密度が 1 以下の燃料油が含まれているためにこれよりも軽くなると考えられる．これを 2 倍して 2 週間分の量として計算する．

幾つかの項目については床面積が基準となっている．そのため一人当たり 7.29m^2 を確保し，倉庫等他のスペース用にその 2 倍量の床面積を確保した， $2000 \times 7.29 \times 2 = 29160\text{m}^2$ を基準面積として一旦重量を算出する．この重量を基準に設計を行い，修正した床面積に準じた重量で性能が確保されるように適宜設計値を修正する．こうして算出された 9081531kg に重力加速度 9.81m/s^2 をかけて 89089819N となる．これと想定床上積載荷重 845640000N を比較すると，想定床上積載荷重のほうが大である．また，仮定建物荷重について，体積当たりの建物荷重は建築構造設計基準に示されたコンクリートの単位体積重量より，鉄骨鉄筋コンクリート造りを想定した 25kN/m^3 とする．ここから床の厚みを 1m として，単位面積当たりの建物荷重を 25kN/m^2 として計算することにした．したがって仮定建物重量は $729 \times 10^6\text{N}$ となる．

よって想定床上積載荷重 845640000N に仮定建物重量 $729 \times 10^6\text{N}$ を加えて $1575 \times 10^6\text{N}$ が第一近似荷重となる．なお，設計上必要に応じて重力加速度で除した $161 \times 10^6\text{kg}$ ($161 \times 10^3\text{t}$) を用いる．

第2章 設計手法

本研究における浮体式津波シェルターは船舶の技術に基づいているが、船体とは全く異なる形状を多く提案した。材質についても船体のように鋼板や GFRP を使用するのではなく、建築構造物と同じく鉄骨とコンクリートを使用した鉄骨鉄筋コンクリート構造を想定している。設置場所についても陸上を想定しているため、船舶の設計手法や海上構造物とは異なる基準で設計する必要があると考えられる。構造物の性質から、津波に対する設計、地震に対する設計、浮体としての設計の3種類を組み合わせることとした [21] [22] [23] [24] [25]。

2-1 大型浮体式津波シェルターの設計手法の検討

2-1-1 津波に対しての設計

該当する基本的な考え方のガイドラインは「津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について」（平成 23 年 11 月 17 日付国住指第 2570 号）における「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」等 [26] [27] [28] を参考に、本研究に合わせて一部変更した手法を用いる。

ガイドラインに示される設計手法は以下の Fig. 2 1 に示す。この手法の中で使われる用語については Table 7 にまとめた。

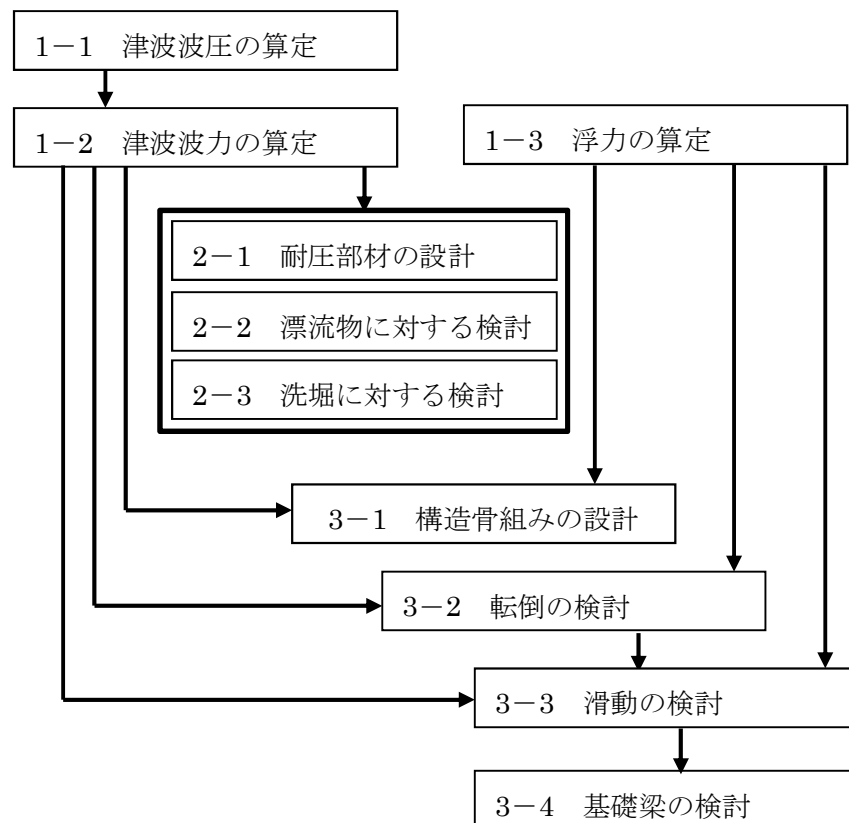


Figure 2-1 Tsunami evacuation building design method

Table 7 Terminology for design methods such as tsunami evacuation buildings

設計用浸水深	敷地に想定される津波の浸水深で建築物が接する地表面までの津波の深さ(m)
津波荷重	津波によって建築物に作用する圧力及び力であり，津波波圧，津波波力及び浮力の総称
津波波圧	<p>津波により建築物の受圧面に作用する水平方向の圧力(kN/m²)</p> <p>津波波圧算定式</p> <p>構造設計用の進行方向の津波波圧は下式により算定する．</p> $q_z = \rho g (ah - z)$ <p>q_z:構造設計用の進行方向の津波波圧(kN/m²)</p> <p>ρ:水の単位体積質量(t/m³)</p> <p>g:重力加速度(m/s²)</p> <p>h:設計用浸水深(m)</p> <p>z:当該部分の地盤面からの高さ(0 ≤ z ≤ ah)(m)</p> <p>a:水深係数 (3 とする．ただし，他の施設等により津波の波圧の軽減が見込まれる場合にあっては，海岸及び河川から 500 メートル以上離れているものについては 1.5，これ以外のものについては 2 とする．)</p>
津波波力	<p>津波により建築物に作用する水平方向の力(kN)</p> <p>津波波力算定式</p> $Q_z = \rho g \int_{z_1}^{z_2} (ah - z) B dz$ <p>Q_z:構造設計用の進行方向の津波波力</p> <p>B:当該部分の受圧面の幅(m)</p> <p>z₁:受圧面の最小高さ(0 ≤ z₁ ≤ z₂)</p> <p>z₂:受圧面の最高高さ(z₁ ≤ z₂ ≤ ah)</p>
浮力	<p>津波により建築物に作用する鉛直上向きの力(kN)</p> <p>浮力算定式</p> $Q_z = \rho g V$ <p>Q_z:浮力(kN)</p> <p>V:津波に浸かった建築物の体積(m³)</p>
受圧面	津波波圧を直接受ける面
耐圧部材	津波波圧を直接受け，破壊しないように設計する部材
非耐圧部材	津波波圧を直接受け，破壊することを容認する部材
構造骨組み	受圧面で受けた力を建築物全体から基礎に伝達する架構

2-1-2 地震に対する設計

大きな津波は巨大地震に付随して起こることが多いことから、津波避難施設としての機能を果たすには耐震性能にも優れている必要がある。耐震性能についての検討は国土交通省国土技術政策総合研究所が発表した「災害拠点建築物の設計ガイドライン（案）」[25]を参考に、Table 8に示す条件を設定した。本来であればこの基準に照らして構造計算をすべきであるが、今回は「鉄骨造建築物の耐震設計」[29]を参考に余裕を持った設計を行うことで基準を満たしたとみなしている。

一例として、本書に記載されている4階建て倉庫の例を挙げる。柱の間隔は9000mm×9000mm、柱に使用する鋼材はBCP235を使用した正方形の中空管で最大□-600×600×25が設定されている。梁はSN400Bを使用し最大でH-900×300×16×28を使用している。これを受け、今回は柱を1000mm×1000mm、床厚を1000mm、柱間隔を10000mmで設定した。柱と床厚は鋼材を内包できる寸法に設定している。柱間隔は参考よりも広いが、これは柱そのものが太くなったことで十分に対応できると判断した。

また、後述するが今回設計した建物は浮体上部に設置している。基礎・地盤に当たるのは浮体部分であるが、今回は強度確保に必要な内部構造をシミュレーション用モデルで再現していない。したがって今回は検討外としている。

Table 8 Seismic standard

建物構造		一般的な建物同様に建築基準法令の規定を満たす
基礎・地盤		上部構造の支点反力を外力に用いて計算
耐震性能	変形制限	層間変形 1/100 以下
	耐力の確保	建築構造設計基準の規定に基づく

2-1-3 浮体としての設計

大型浮体式津波シェルターの設計には耐震性能・耐津波性能・浮体性能の3つが必要であることを先述した。ここでは浮体性能を考慮した設計手順について述べる。

今回の浮体設計を通して整理した手順を Fig. 2 2 に示す。また、用語については Table 9 に整理した。

Table 9 Floating body design method terminology

積載荷重	水や食料など生活に必要な物資全体の荷重
浮体内部積載予定荷重	積載荷重のうち、浮体内部に積載する荷重
建物積載予定荷重	積載荷重のうち、建物に積載する荷重
建物床上最大積載荷重	建物の床上に積載できる最大の荷重
浮体内部最大積載荷重	浮体の内部に積載できる最大の荷重
必要全体重量	喫水を確保するために大型浮体式津波シェルター全体に必要な重量
建物本体重量	壁や柱など、建物の構造全体の重量
浮体本体重量	壁や強度材など、浮体の構造全体の重量
バラスト荷重	必要全体重量に足りない荷重を補う

まず、床上に乗せる荷物や人員、資材等を設定する。資材には非常用食料、燃料、原水等を含む。これら床上に乗せる荷重を積載荷重とした。次に積載人数に合わせて通常利用スペースとなる建物の幅、奥行き、高さを定めて外形を決定する。建物寸法を定めたことで床面積が算出される。

次に浮体外形を決定する。幅と奥行きは自由度のある設計が可能だが、浮体部分の設計では高さについて検討する際には考慮する点がある。図 2 2 に示す通り、今回採用した囲み型係留では喫水の深さが対応できる津波高さになる。従って、浮体高さを検討する際には想定対応津波高さに乾舷を加えた値となるように設計する。

この時点で大まかな床面積が算出可能であることから、積載荷重の分配について検討する。浮体内部の空間も利用することを考えたとき、建物は積載荷重全体から浮体内部積載予定荷重を引いた荷重だけを積みばよい。これを建物積載予定荷重とした。ただし、設定した積載荷重に含まれているものは表 2 2 の通りで日常使用する資機材は含まれていない。よって設計時には、建物の床面積を床当たり最大積載量で乗じた建物床上最大積載荷重を用いることにした。この時、建物積載予定荷重よりも建物床上最大積載荷重が十分に大であれば設計を進める。

さて、ここでバラスト荷重について検討する。浮体の面積によっては、予定喫水深を得るために浮体内部にバラストの役割を果たす荷重を設定する必要がある。この荷重を求めるために現在推定できる荷重を整理していく。建物本体の重量は床面積と建物高さ、建物素材から推定することができる。浮体本体についての重量も同様だ。次に積載荷重について、建物内部の荷重は建物床上最大積載荷重の値を使用する。浮体内部の積載荷重については浮体内部積載予定荷重を使用

してもよいが、この時点で浮体内部の積載スペースを設定した場合はそれに合わせて浮体内部最大積載荷重を設定する。この時建物と同様に浮体内部積載予定荷重よりも浮体内部最大積載荷重が十分に大となるよう留意する。予定喫水深を得るために必要な全体の重量は浮力のつり合い式から求めておく。この重量を必要全体重量とした。必要全体重量から推定した荷重を全て引いた数値をバラスト荷重として使用する。ここで求めた値のうち、建物本体重量と浮体本体重量、バラスト荷重は仮定の値である。このことからそれぞれ第一次仮定建物本体重量、第一次仮定浮体本体重量、一次仮定バラスト荷重とする。

仮定の値を基に、建物や浮体の内部構造について詳細に設計を行う。柱形状や配置、吹き抜けや壁などを配置し、必要であれば荷重の分布を設計する。浮体内部についても同様に強度材やバラスト区画、地下室などの配置を行い、荷重の分布を設計する。これらの設計により、建物本体重量と第二次仮定浮体本体重量が決定される。それに伴ってバラスト荷重が変更される。これを第二次仮定バラスト荷重とした。概要設計と詳細設計を分けたのは、バラスト周辺の設計を簡易にするためだ。バラスト荷重が変更されればバラスト区画の大きさが変わり、それに伴って浮体本体重量も変更される。これらのバランスを見極めつつ浮体本体重量とバラスト荷重を決定する。

荷重についての計算の次に喫水を算出し、予定した喫水との差を確かめる。この時留意すべきなのは、この設計は最大積載荷重に基づいて行われている点である。通常運用する際に常に最大積載荷重であることは考えにくい。積載荷重が減ると喫水深が減少し、対応できる津波高さも低くなってしまう。したがって予定喫水深よりも大であることが望ましいと考える。

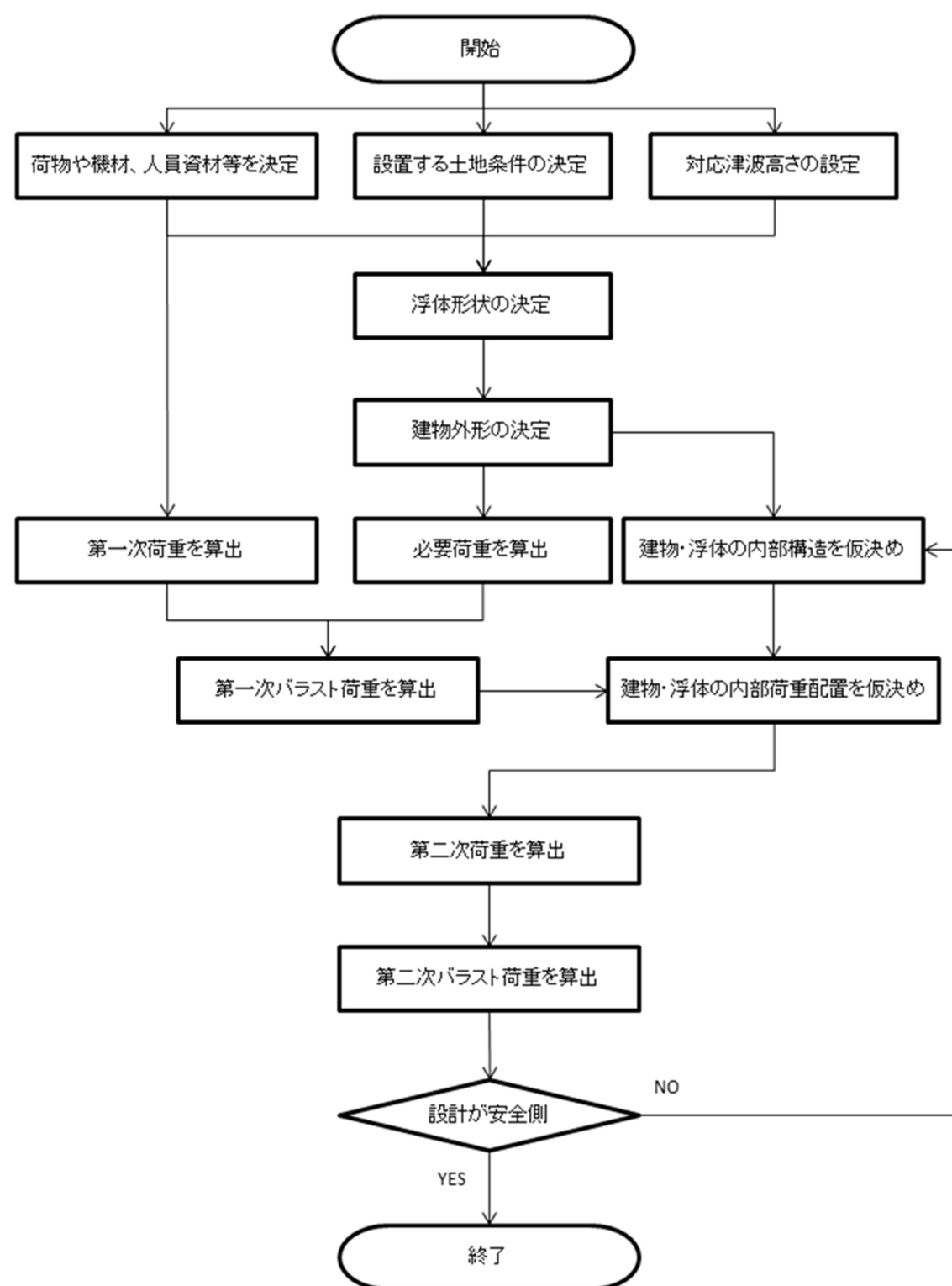


Fig. 2-2 Floating body design method

2-2 設計した浮体

Fig. 2 3 に設計した浮体の全体図を示す. Fig. 2 4 は浮体の断面図, Fig. 2 5 は浮体を設置する地面形状である.

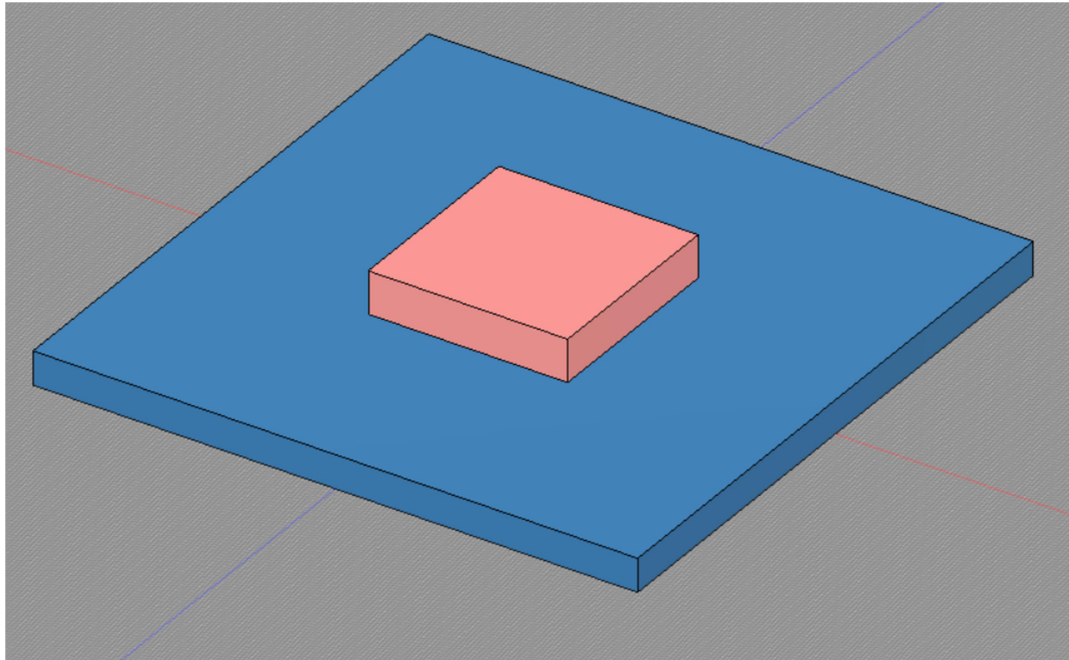


Fig. 2-3 Overhead view

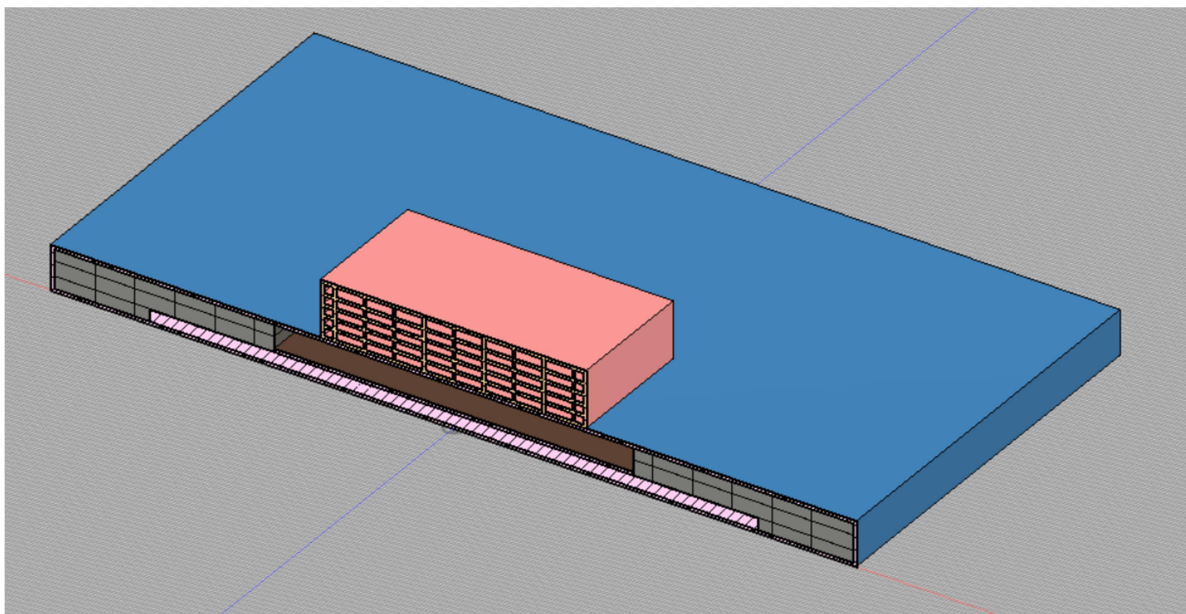


Fig. 2-4 Overhead view cross section

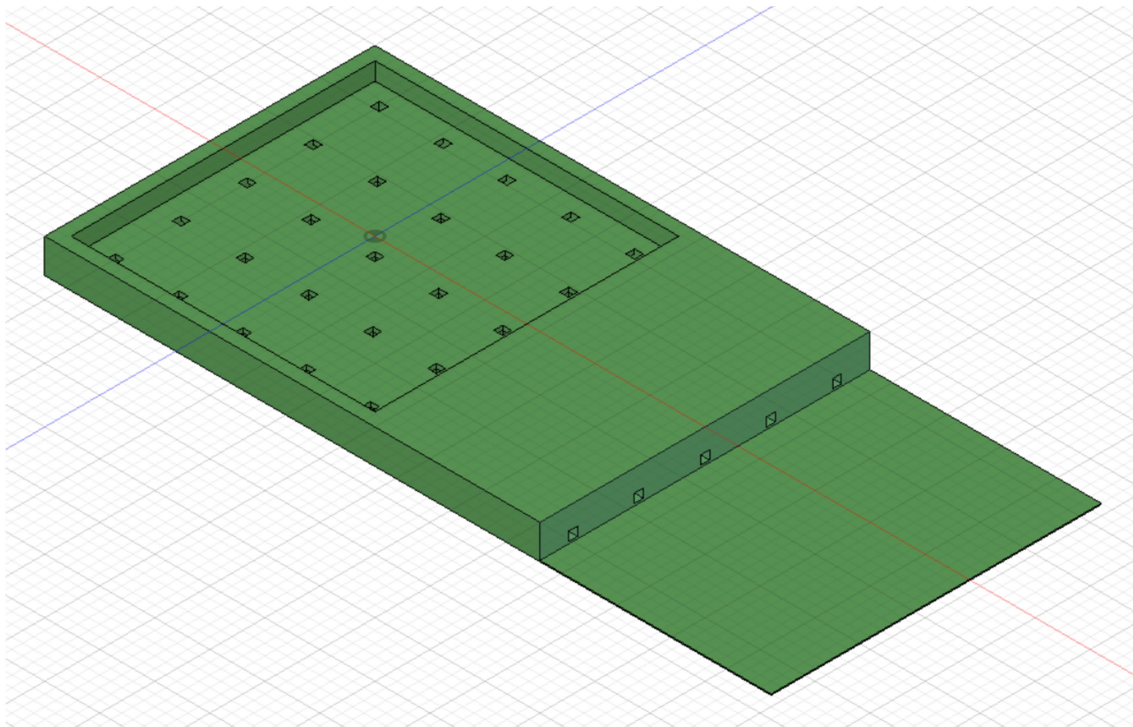


Fig. 2-5 Waterway

Table 10 Floating body specifications

建物縦長さ	89m
建物横長さ	89m
建物高さ	18. 5m
浮体縦長さ	270m
浮体横長さ	270m
浮体高さ	15m
積載荷重	$1.55 \times 10^8 \text{N}$
建物重量（建物本体の重さ）	$1.32 \times 10^9 \text{N}$
浮体重量（浮体本体の重さ）	$4.17 \times 10^9 \text{N}$
バラスト荷重	$4.16 \times 10^9 \text{N}$
喫水深	13.4m

2-3 MPS 用簡易モデル作成

模型実験と数値計算結果を比較する時、模型と数値計算モデルの相似が確保されていなければならない。概形の幾何学的相似はもちろん、重心の位置にも気を配る必要がある [30]。

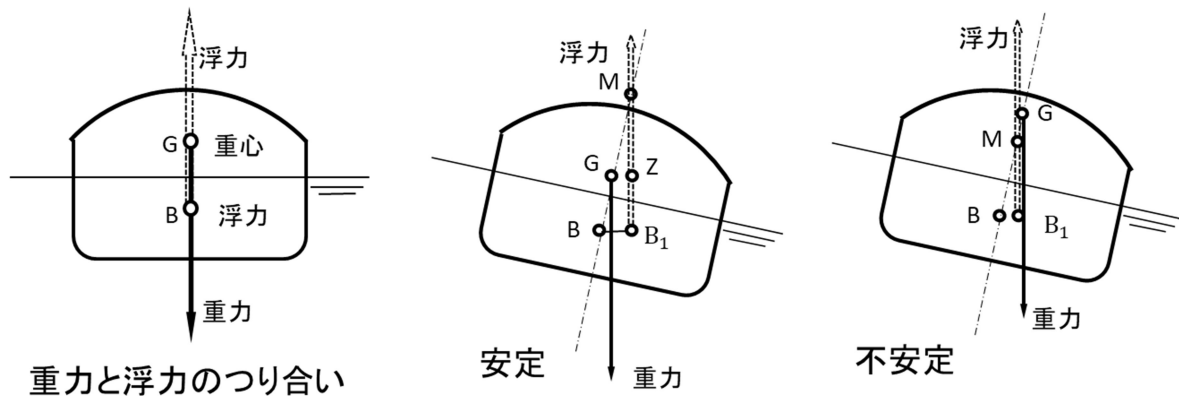


Fig. 2-6 Relationship between center of gravity and buoyancy

Fig. 2 6 は重心と浮力の関係を示している。たとえ喫水が同じでも、重心が異なれば浮心との距離が変化し、浮体の復元力に影響を及ぼす。復元力は浮体の耐津波特性にも大きくかかわる項目であることから、大型浮体式津波シェルターの設計を行う際には重心に着目した数値シミュレーションと模型実験が必要である。

実験用の模型と数値シミュレーション用モデルの間で重心が異なってしまう例として、以下の様な事例が考えられる。

Fig. 2 7 は浮体外壁の厚さがシミュレーションモデルと実験用模型で異なる例だ。



Fig. 2-7 Case 1

シミュレーション用模型で粒子数を減らし、密度で質量を合わせると図に示した状況になる。シミュレーションではできるだけ粒子数を減らし計算を軽くすることが必要な場合もあるが、安易に密度で調節すると重心が異なる模型になってしまう。また、数値シミュレーションモデルで再現したい形状が複雑である場合も同様である。

次に示す Fig. 2 8 は，喫水調整用重りの外形が再現されていない例である．



Fig. 2-8 Case 2

喫水に着目して全体の質量を合わせた場合に発生する．模型に使用した喫水調整用重りと数値シミュレーション上の重りの体積が異なっていると，重心が異なってしまう．

しかし，重心に留意して数値シミュレーションモデルを作成する場合，いくつか困難な点が存在する．そのために先述したような重心が不正確な数値シミュレーションモデルが出来上がってしまう可能性が考えられる．

ひとつ目は実寸モデルを忠実に再現すると粒子数が膨大になる点だ．

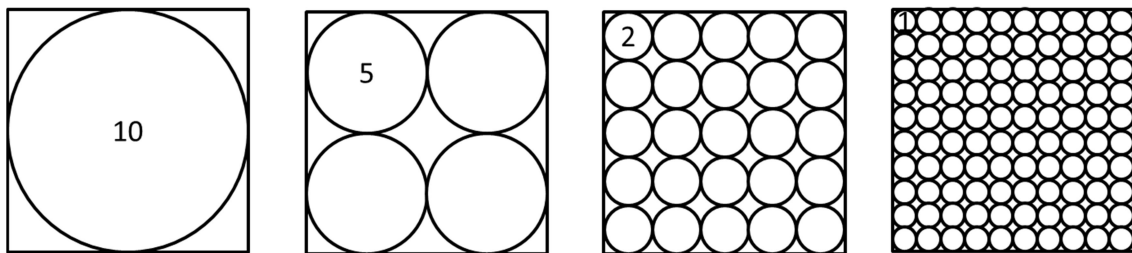


Fig. 2-9 Relationship between particle size and number of particles

Fig. 2 9 は厚さ 10 の壁を作りたい時に粒子を並べる方法を簡易に示している．粒子径を整数で考えた場合，10，5，2，1 の 4 種類の選択肢があるように思われる．しかし，内部や入り組んだ形状を正確に再現しようと考えたとき，すべての壁厚が 10 であるとは考えにくい．むしろ，再現したい構造が詳細になれば壁厚は様々に，10 や 3，1 などが入り混じること考えられる．そうした場合，粒子径は全ての外壁厚さの公約数に設定する必要があるが生じる．先ほど例に挙げたように 10，3，1 の壁が存在するときは粒子径 1 の粒子で構成しなければならない．図にも示す通り，厚さ 10 の壁を粒子径 1 の粒子で構成すると，粒子数は膨大になってしまう．

二つ目は粒子密度の設定だ．今回使用する数値シミュレーション手法である MPS 法において，一般に壁粒子は 3 層から構成される．これは粒子の通り抜けを防止するためだ．これに習って浮体も 3 層，もしくは 3 層以上で構成したい時，粒子径はそのままに粒子密度で質量を合わせることも可能だ．こうした場合，数値シミュレーションモデルを先に作ってその結果を模型実験によって確かめたい時，現実には存在しない材料密度を用いたために正確な再現が困難になってしまう．

これまでに述べた問題点を踏まえ，簡易モデルの設計手法について説明する．

簡易モデルでは外形・質量・重心の 3 点を可能な限り保持することとした．実際に作成した建物部分のモデルが Fig. 2-11，その元となった建物部分の詳細設計モデルが Fig. 2-10 である．

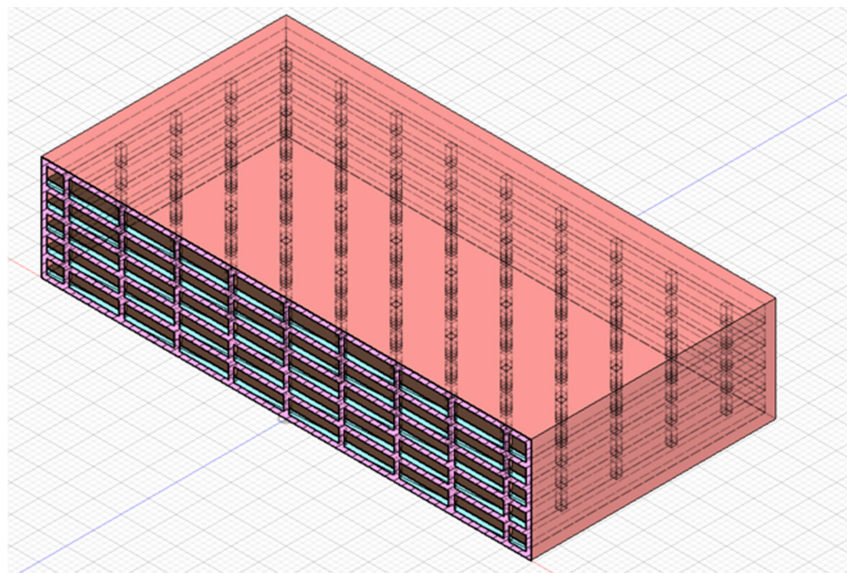


Fig. 2-10 Detailed model (building)

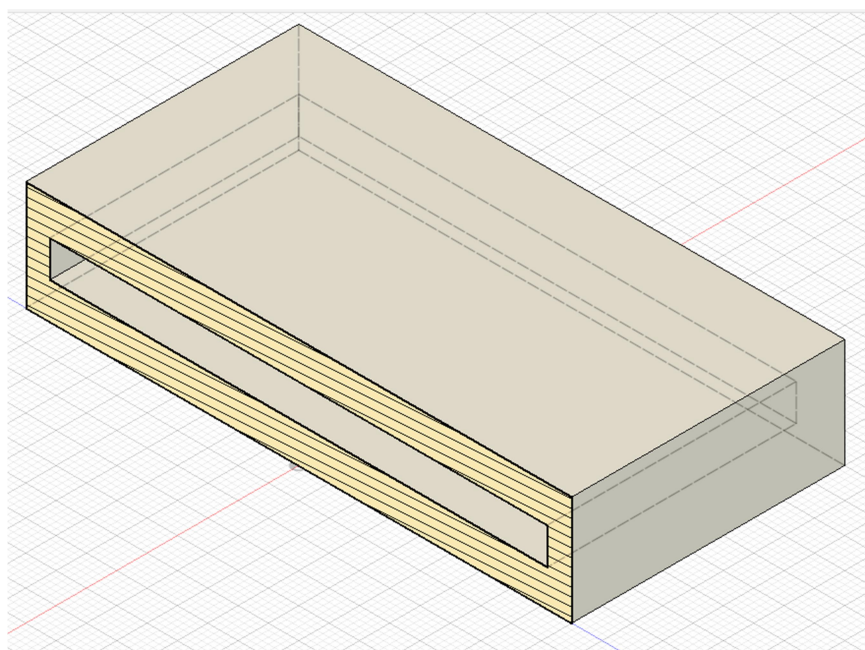


Fig. 2-11 Simple model (building)

次に，作成した簡易モデルを MPS 用のモデルに変換する．MPS 法では粒子の位置を座標によって表現している．この座標情報を 3D モデルから取り出すことを目指す．今回はモデル上の粒子を並べたい面にメッシュを作成し，メッシュの接点情報を利用して粒子の座標を割りだし，点群データ化した．Fig. 2 12 がメッシュモデルである．要素法などでメッシュを利用する際は対象物とシミュレーション解像度の兼ね合いからその表面を表すのに適したメッシュサイズをある程度自由に割り当てるが，この手法ではメッシュサイズがそのまま粒子間距離に当たる．したがって粒子間距離を一定にするためにメッシュサイズも一定とする．作成したメッシュは STL データに書き出し座標データに変換し Fig. 2 13 に示す点群モデルとした．

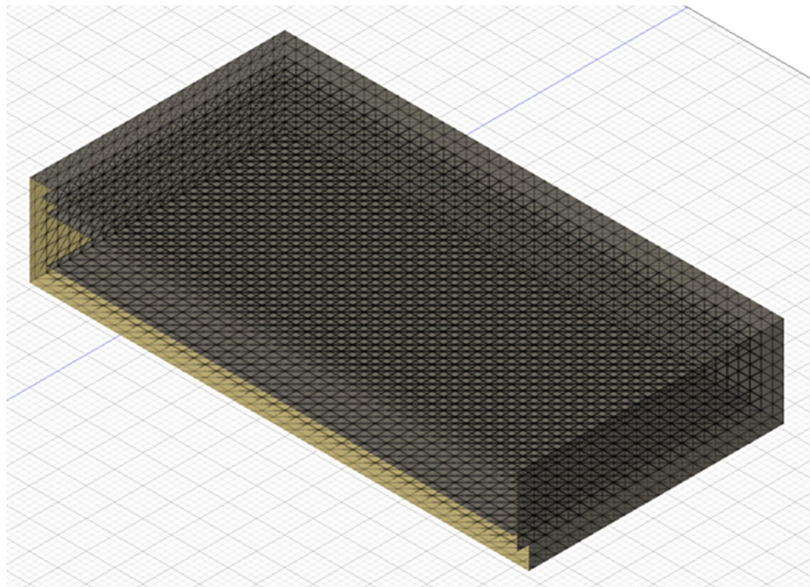


Fig. 2-12 Mesh model (building)

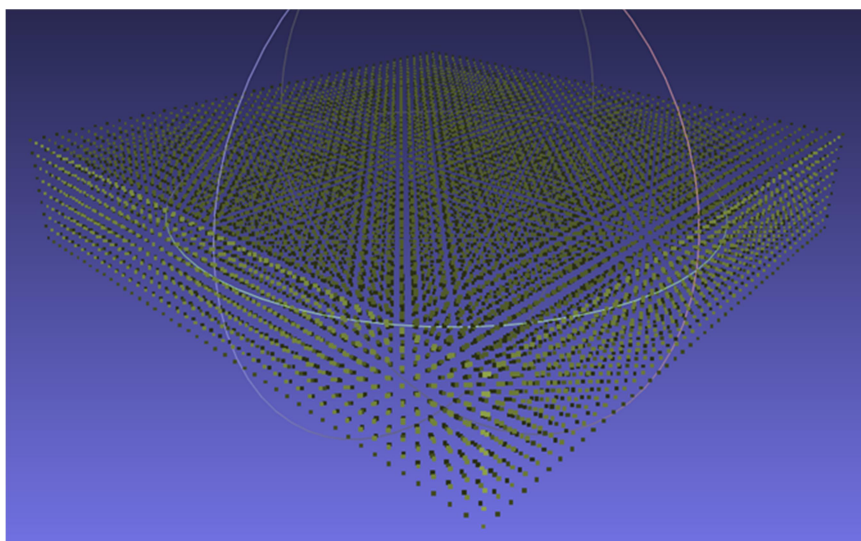


Fig. 2-13 Point cloud model (building)

第3章 数値シミュレーション概要

3-1 MPS 法の概要

本研究ではシミュレーションに MPS(Moving Particle Semi-implicit)法を用いる。MPS 法とは粒子法的一种である。粒子法とは連続体を有限個の粒子によって表した方法で、粒子の運動によって連続体の挙動を計算する。格子を用いることなく微分方程式を一般化する手法で、確率論を用いずに決定論的な過程のみを用いることが特徴である [31] [32]。

3-2 使用した波

Fig. 3 1 は計算に使用した波の様子を示している。実寸で最大波高約 10m の段波を使用した。波高計測定点として Fig. 3 2 に示した場所での波高変化を記録している。噴出口がない状態で記録した。

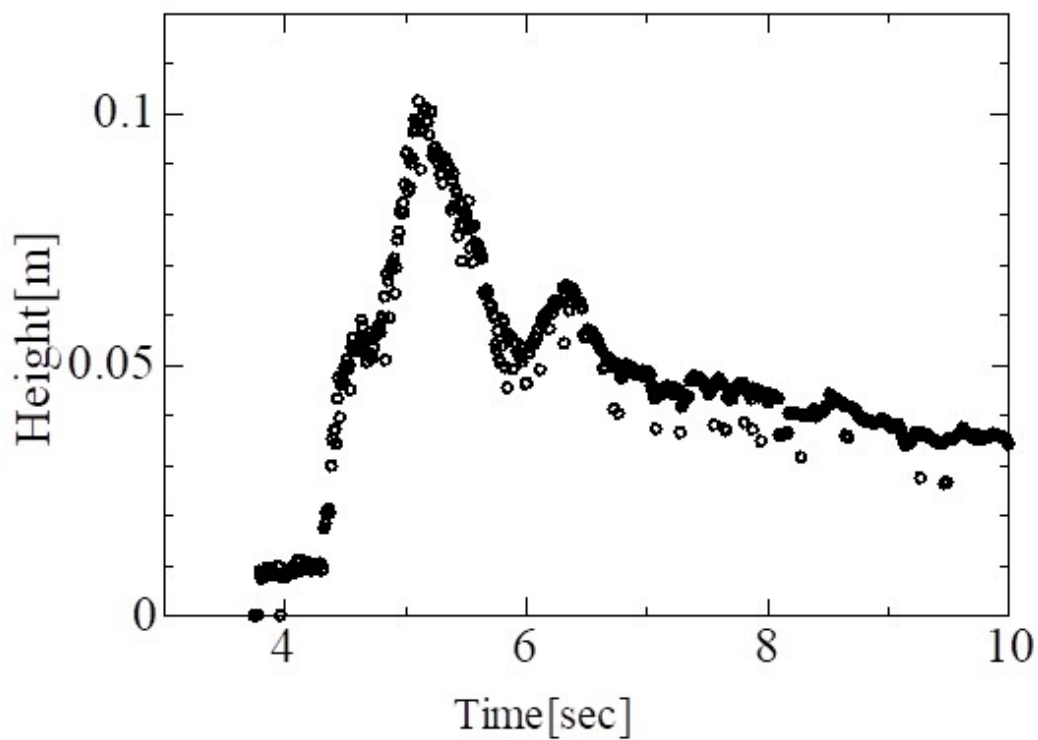


Fig. 3-1 Wave height

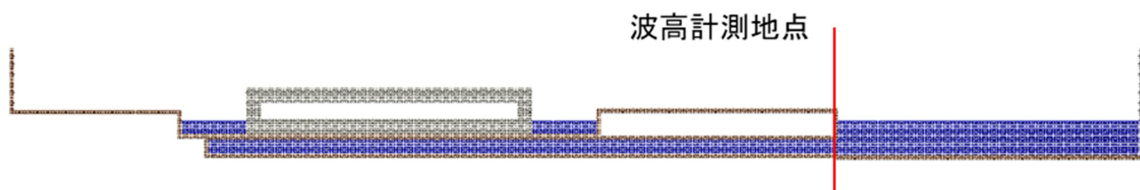


Fig. 3-2 Wave height measurement point

3-3 水管の有効性を確かめる数値シミュレーションの計算条件

Fig. 3 3, Fig. 3 4 にシミュレーションに使用したモデルを示す．設計は 3D で行ったが，計算機の性能の都合上計算は 2D で行う．作成した 2D 用モデルは，設計・製作した 3D モデルの情報を基に再構成したものである．浮体粒子密度は 300kg/m^3 ，水粒子密度は 1000kg/m^3 を設定している．

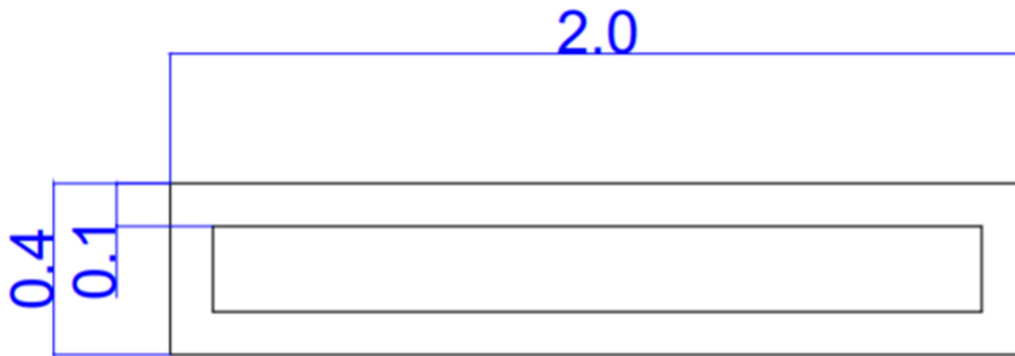


Fig. 3-3 Floating body plan

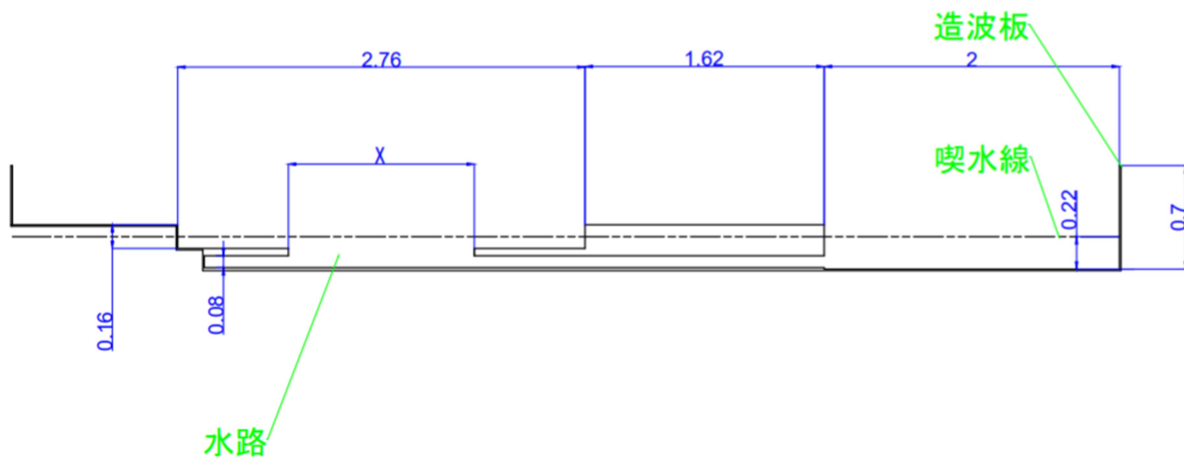


Fig. 3-4 Waterway plan1

3-4 重心の変化による耐津波特性への影響を確かめる数値シミュレーションの計算条件

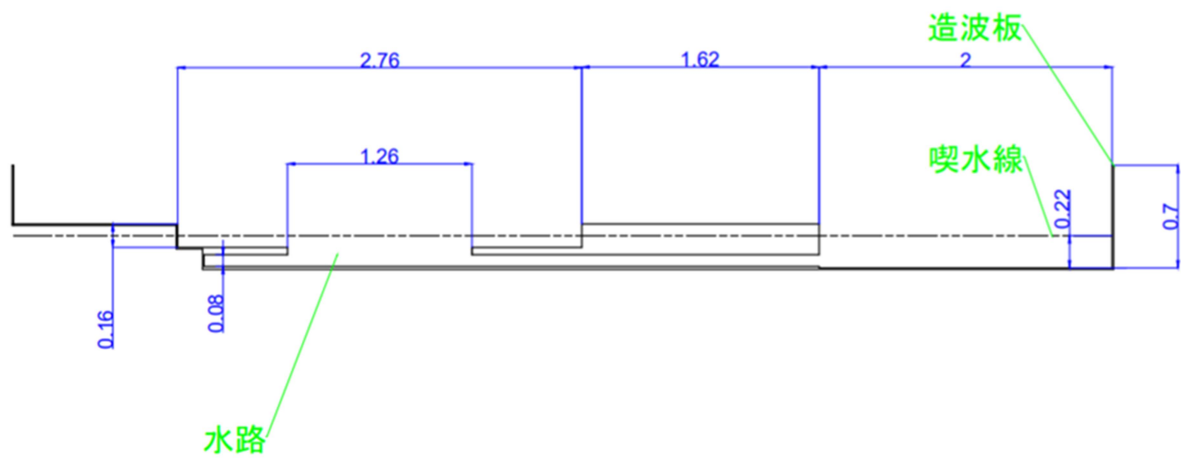


Figure 3-5 Waterway plan2

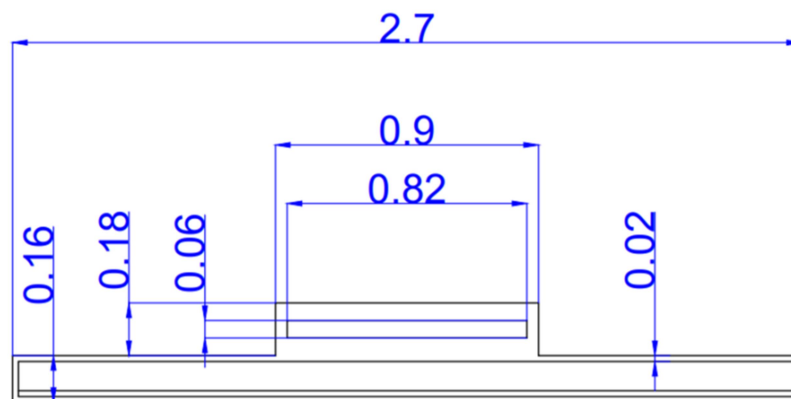


Fig. 3-6 Floating body plan view (convex type)

Fig. 3 5, Fig. 3 6 に示すモデルで計算を行った.

Table 11 に粒子密度を示した．2D で計算するにあたり，津波の回り込みが表現できないことから浮上に不利であることを考慮し，粒子密度を再設定している．

Table 11 Particle density 1

	密度
浮体構造粒子	594.0kg/m ³
バラスト粒子	1144.0kg/m ³
水粒子	1000.0kg/m ³

Table 12 には基本形の凸型浮体粒子質量，バラスト粒子質量を示した．凸型浮体総質量は基本形の凸型浮体粒子質量，バラスト粒子質量に加え，バラスト固定用粒子を加えた質量になる．バラスト固定用粒子は最大 20 個程度で全体から見ると微量であるため，評価には問題ないものとした．

Table 12 Floating body mass 1

	質量
浮体構造	2934.0kg
バラスト	532.0kg

以上に示した条件のもと，時間刻み幅 0. 01sec で計算を行った．

表は今回計算に使用したパターンを，バラスト粒子の重心座標として示している．

Table 13 Case name

		y		
		0.175	0.215	0.245
x	0. 54	L_L	L_M	L_H
	1. 2	M_L	M_M	M_H
	1. 86	R_L	R_M	R_H

第4章 結果と考察

4-1 水管の有効性

水管と噴出口を設置して津波を導入する手法の有効性を確かめるため、噴出口の幅を変化させて計算を行った。以下に結果のグラフと考察を示す。

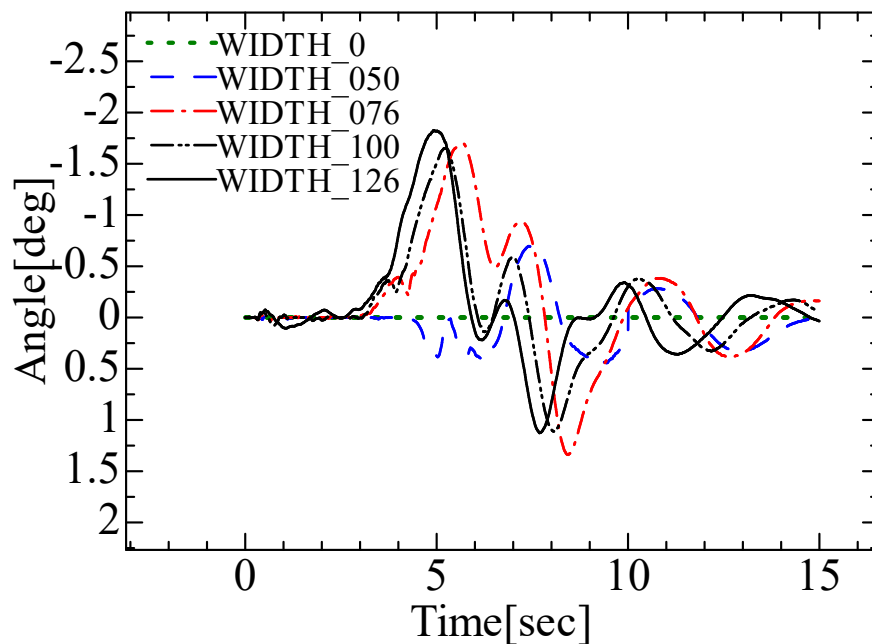


Fig. 4-1 Relationship between spout width and float angle

Fig. 4 1 は矩形浮体の傾きと時間の関係を示したグラフである。凡例が示す通り、噴出口両端粒子間の中心距離を変更して計算した。堀に津波が到達したのは 5.75sec である。まず WIDTH_0 について、浮体底面角度が全く変化していないのは堀底面と設置したまま浮上しなかったためである。これは堀底面との間に負圧が発生し、離脱に至らなかったためであると考えられる。

WIDTH_076, WIDTH_100 と WIDTH_126 は、それぞれ立ち上がりや振幅、周期に差異がみられるものの、波形は似通っていることが分かる。初期に大きな傾斜が発生しているのは、図に示すように噴出口が広く、流入した水粒子が浮体の傾斜を大きくするような作用をしているためであると考えられる。また、2D での計算であるために水粒子の回り込みを再現できておらず、この点も傾斜が大きく出た理由として考えられる。対して噴出口を狭くした WIDTH_050 では他に比べて安定した浮上を見せている。

次に矩形浮体の浮上高度と時間の関係を表した結果グラフを Fig. 4 2 に示す.

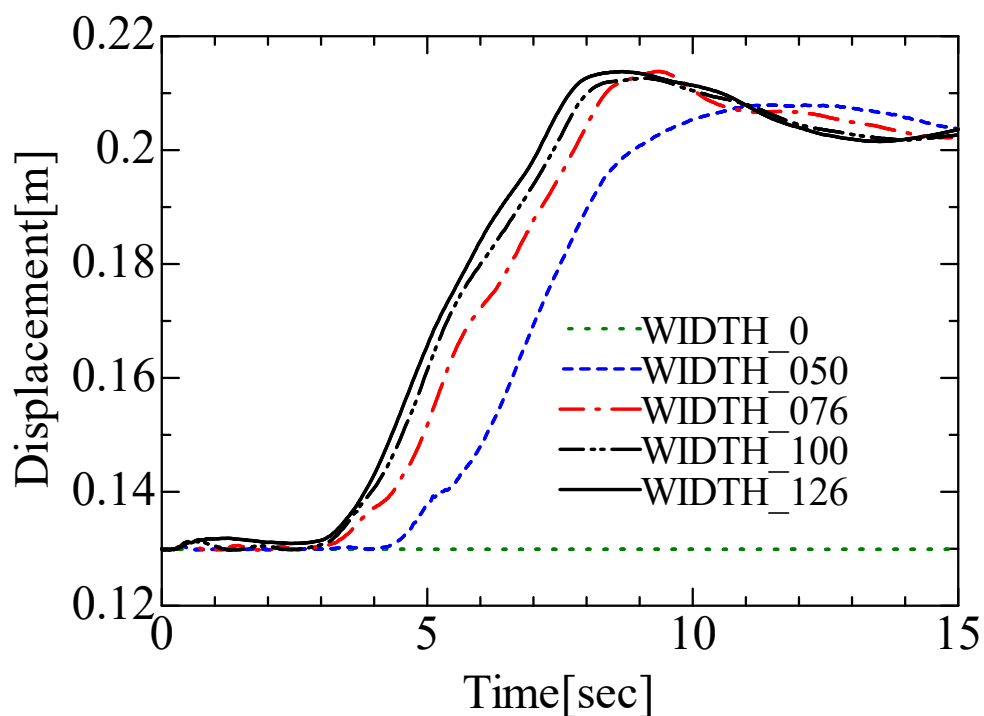


Fig. 4-2 Relationship between spout width and float angle

傾きと時間の関係を示した図と同様, 図でも波形が WIDTH_050 と WIDTH_076, WIDTH_100, WIDTH_126 で分かれたことが読み取れる. 後者 3 つのグラフの変位が WIDTH_050 に比べ大きく出ている理由として, 傾斜が大きいまま浮体が上昇したためだと考えられる. また, WIDTH_050 のみグラフの立ち上がりが 1sec 程度遅れていた. これは噴出口が他と比べ狭いことにより流入粒子が制限され, 浮上に至るまで時間がかかったことによる.

以上の結果から, 水管と噴出口を用いた適切な津波導入は, 接地状態の浮体に対して安定な浮上を目指すときに有利であると考えられる.

Fig. 4 3~ Fig. 4 8 は計算結果を可視化した映像のスナップショットだ. (A)~(H)はそれぞれ 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14sec 時点の挙動を示している.

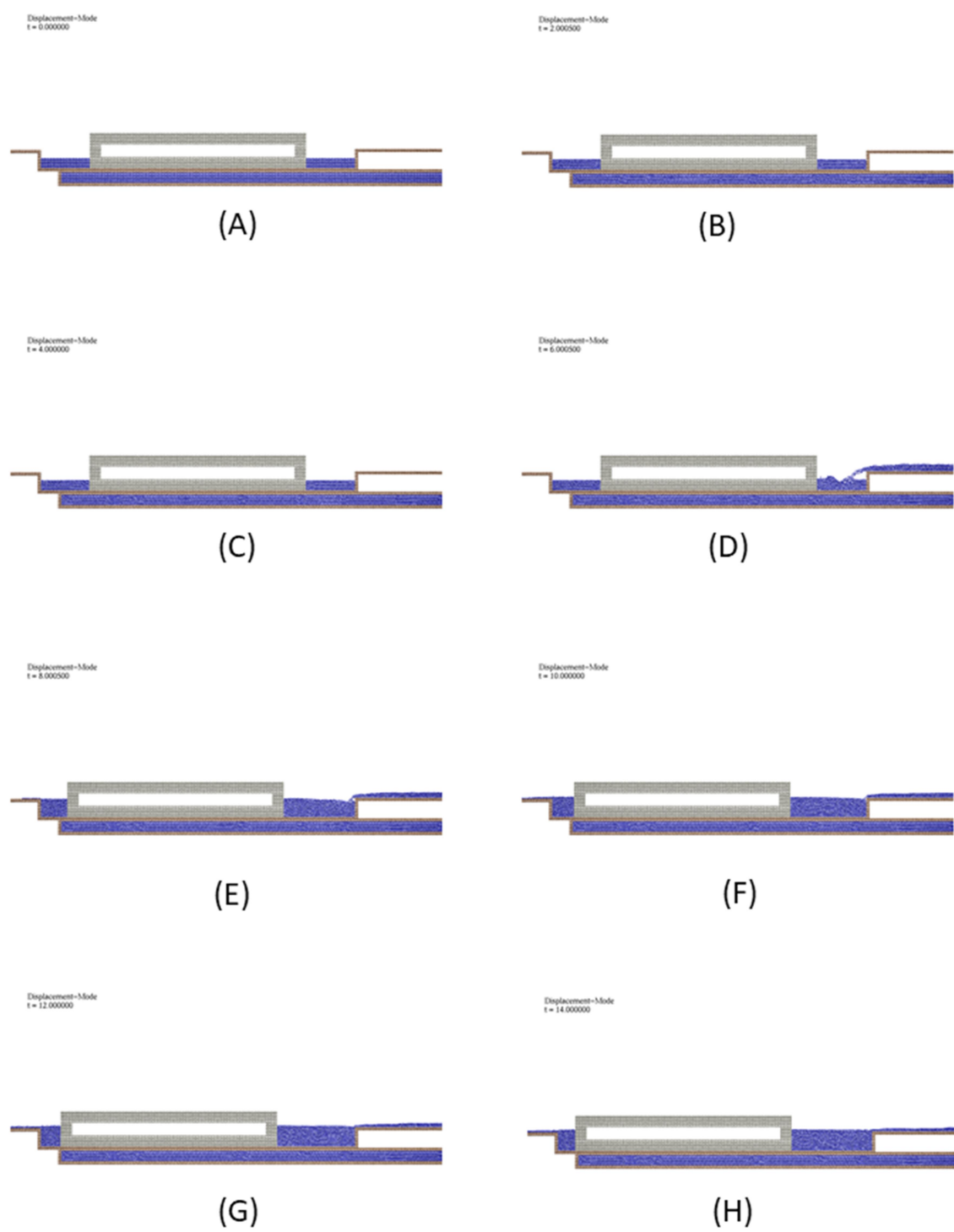


Fig. 4-3 Motion of a float (WIDTH_0)

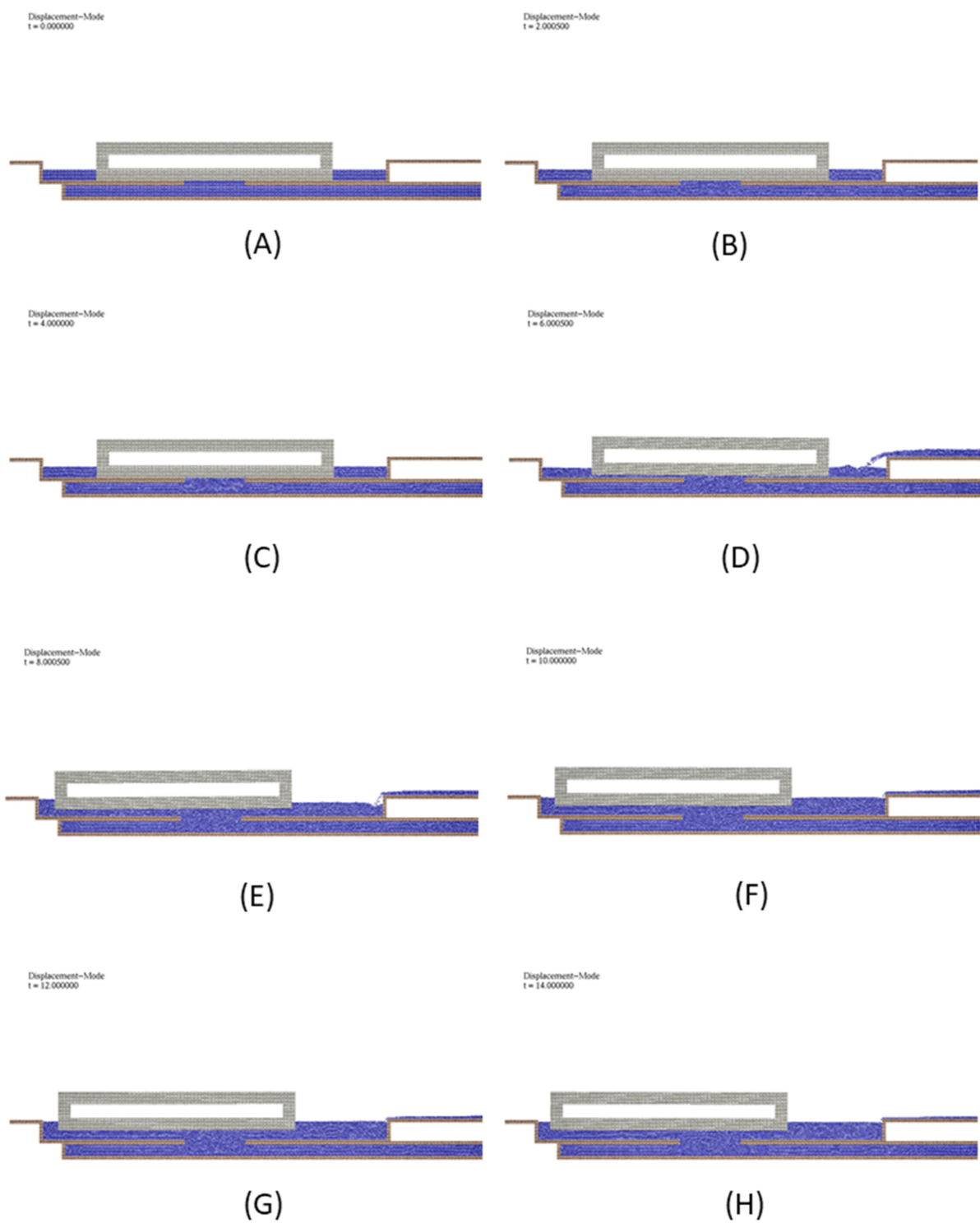


Fig. 4-4 Motion of a float (WIDTH_050)

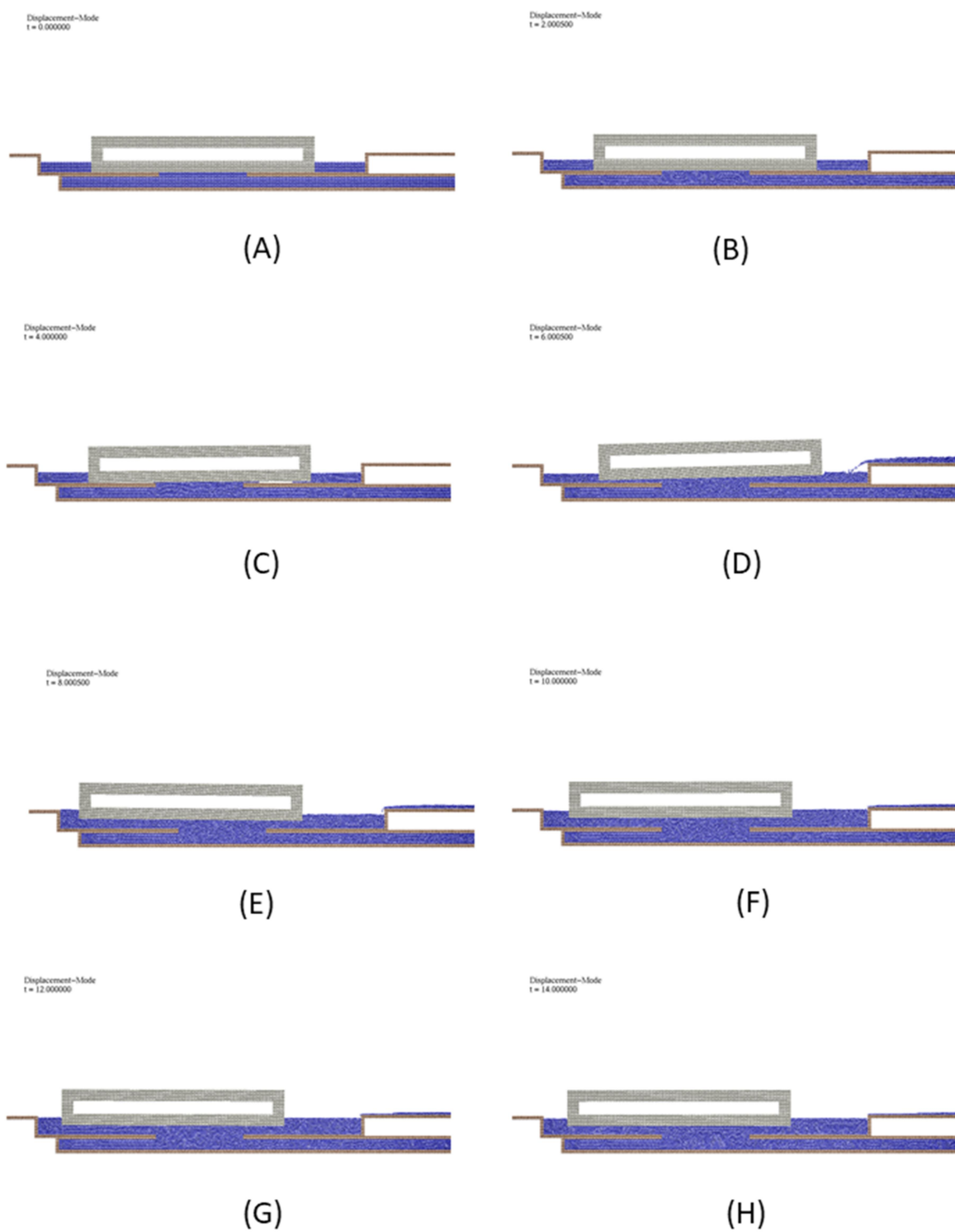


Fig. 4-5 Motion of a float (WIDTH_076)

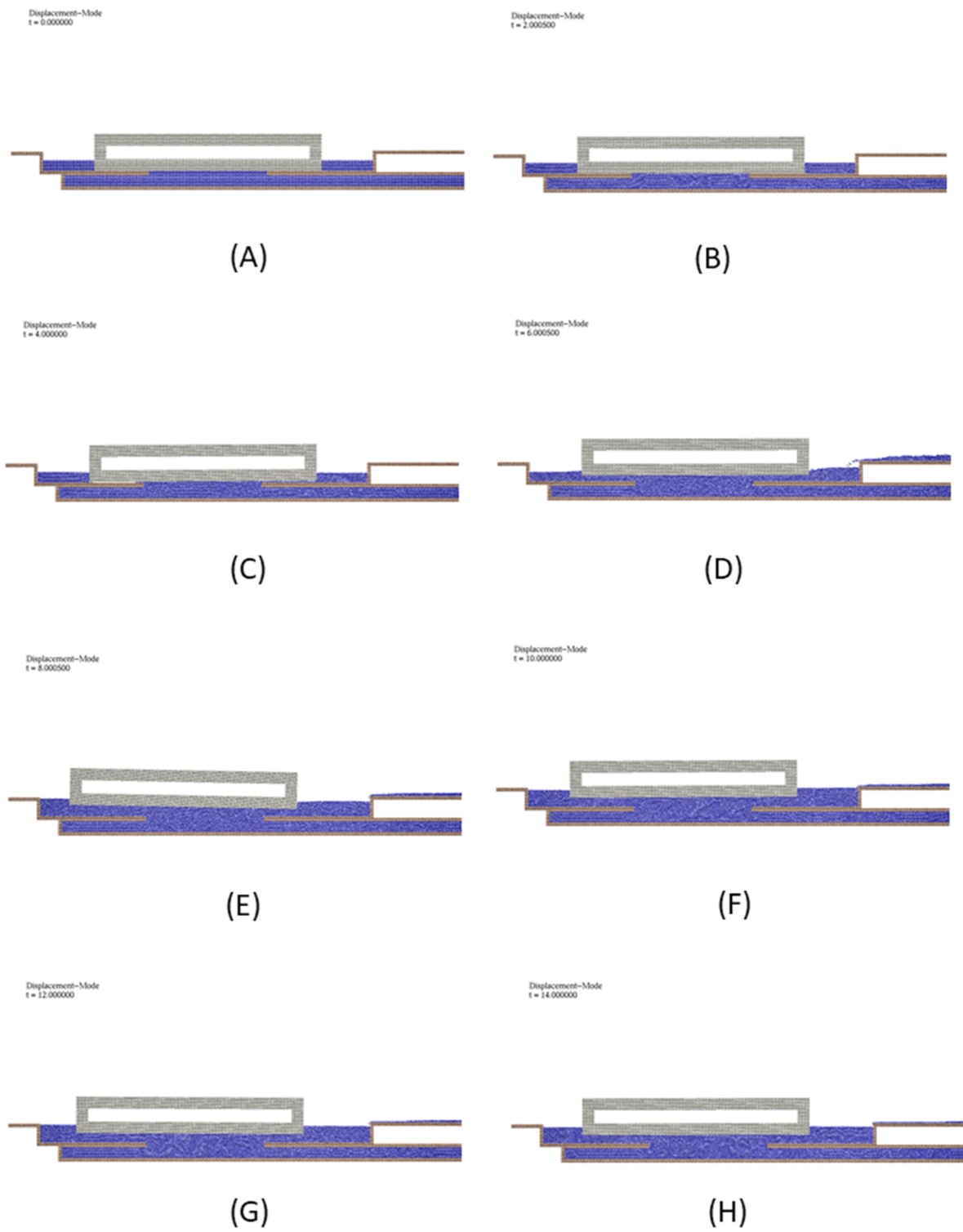


Fig. 4-6 Motion of a float (WIDTH_100)

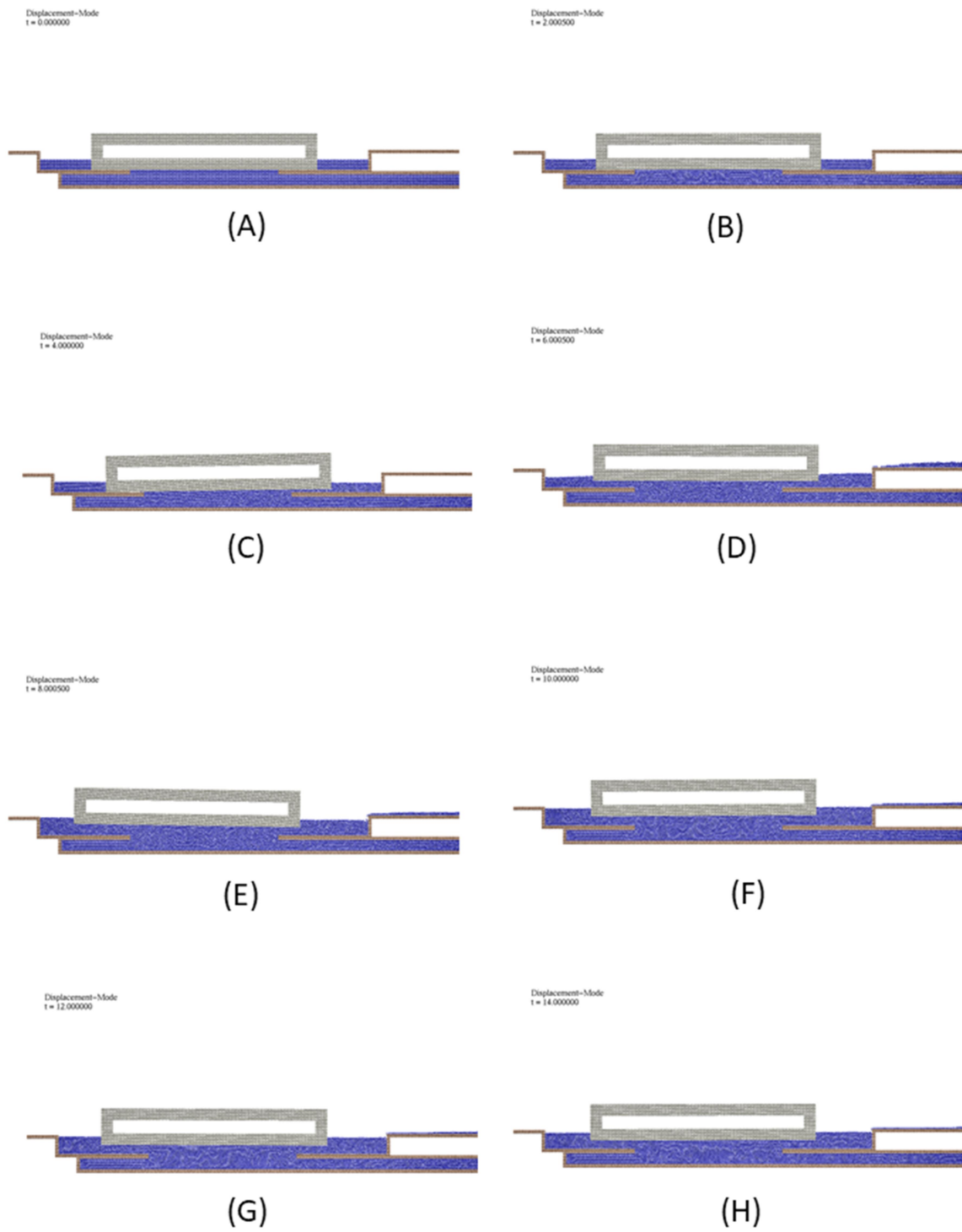


Fig. 4-7 Motion of a float (WIDTH_126)

4-2 重心の変化による耐津波特性への影響

Fig. 4 9~ Fig. 4 17は計算結果を可視化した映像のスナップショットだ. (A)~(H)はそれぞれ0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14sec 時点の挙動を示している.

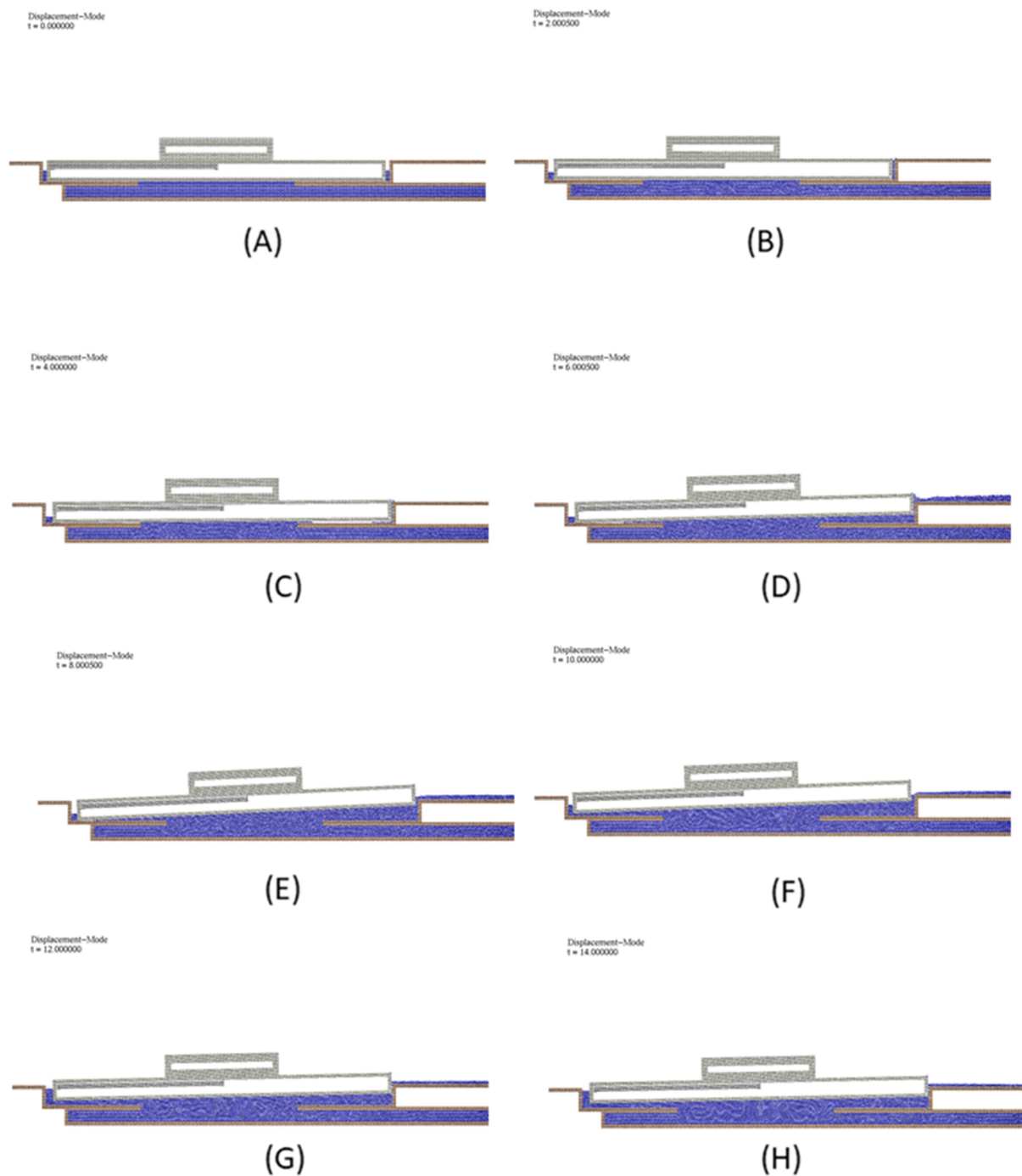


Fig. 4-8 Motion of a float (L_H)

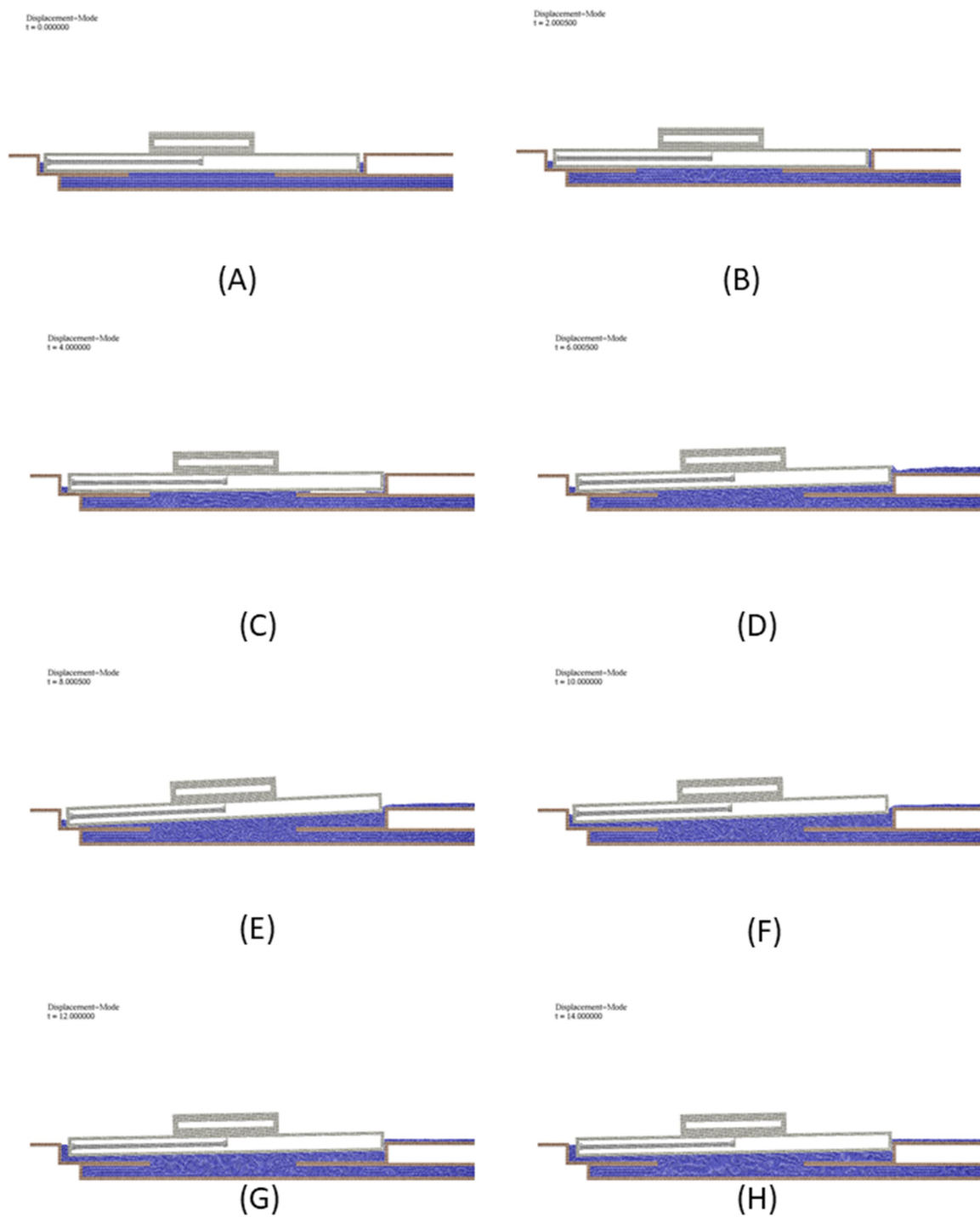


Fig. 4-9 Motion of a float (L_M)

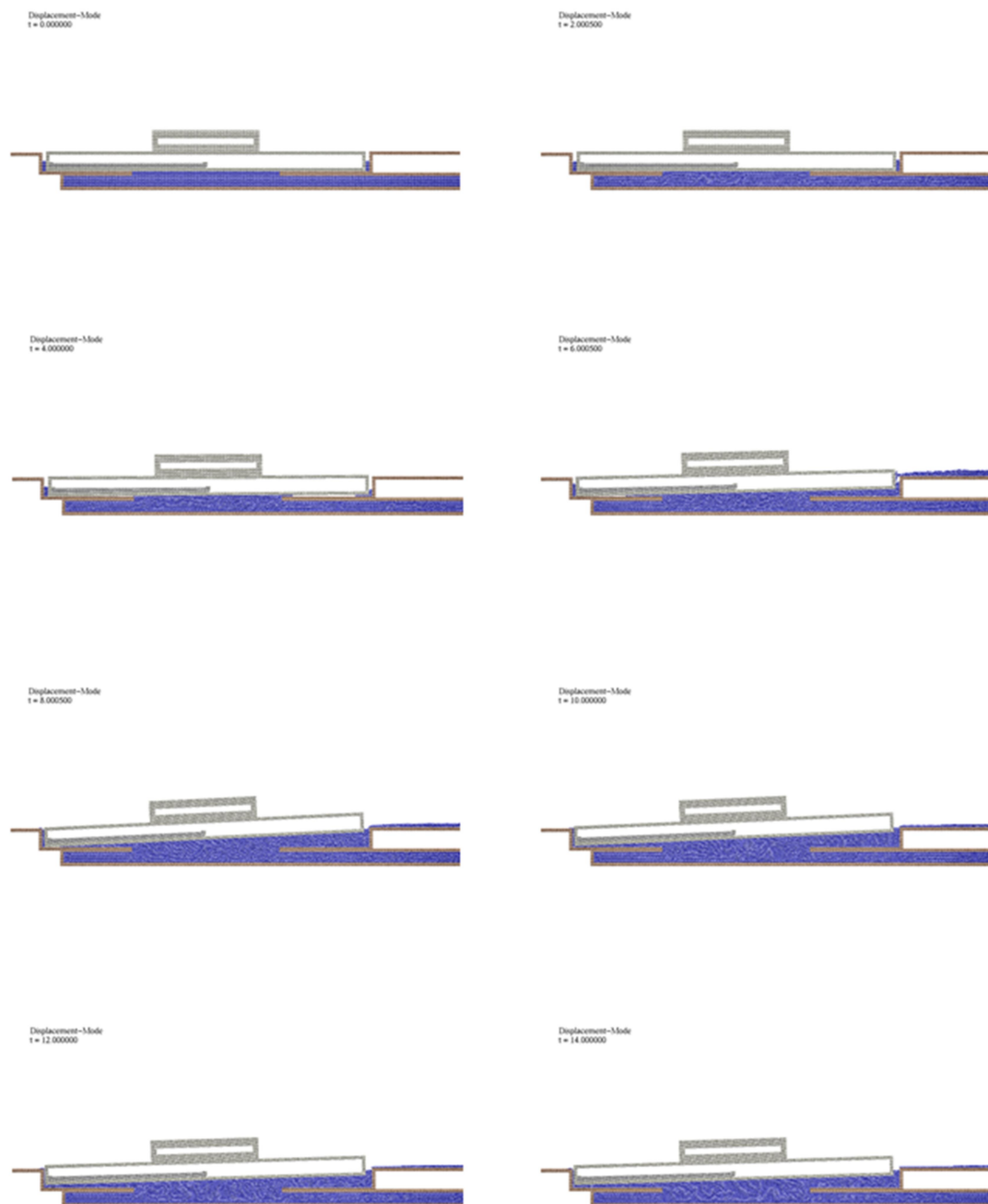


Fig. 4-10 Motion of a float (L_L)

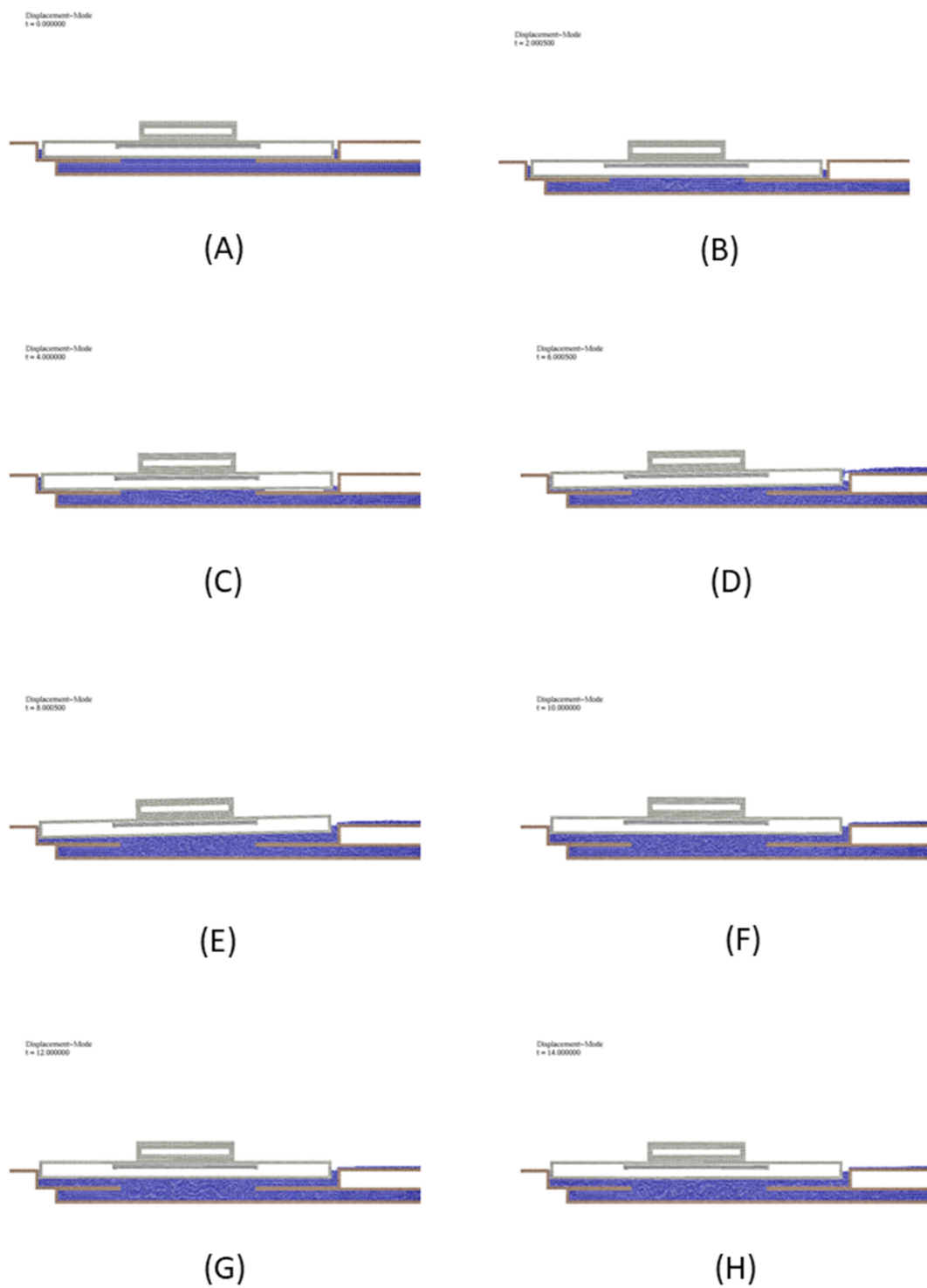


Fig. 4-11 Motion of a float (M_H)

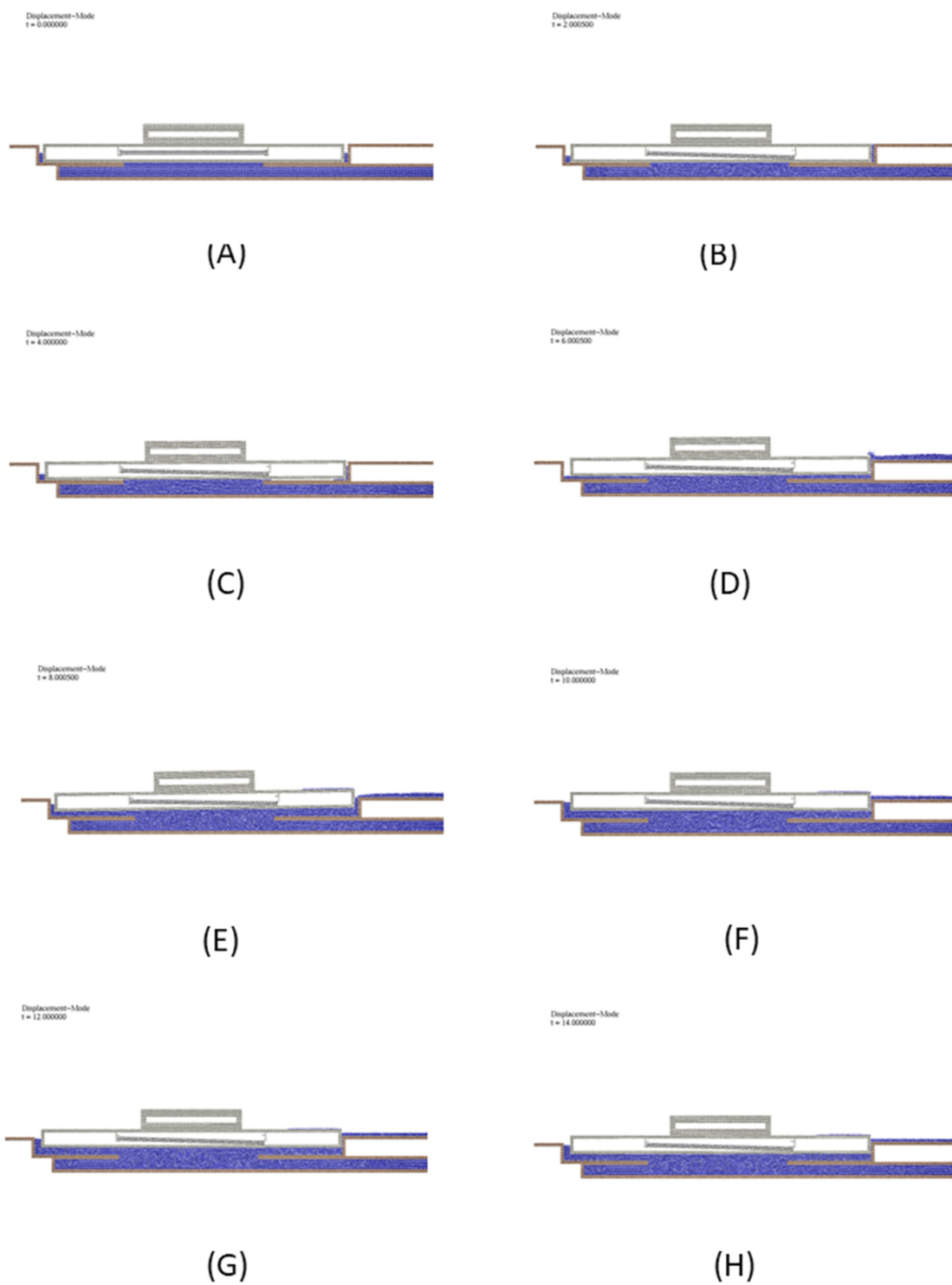


Fig. 4-12 Motion of a float (M_M)

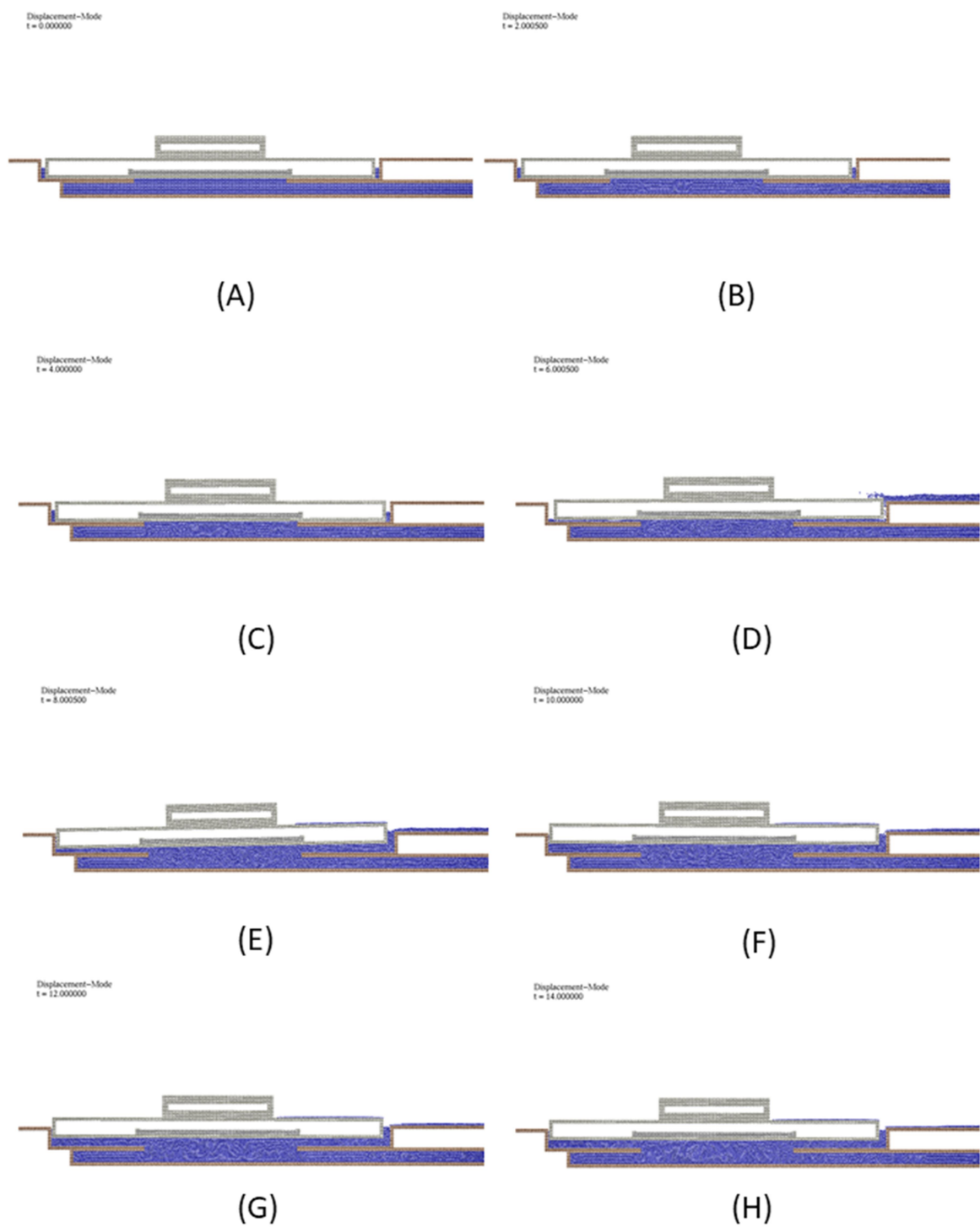


Fig. 4-13 Motion of a float (M_L)

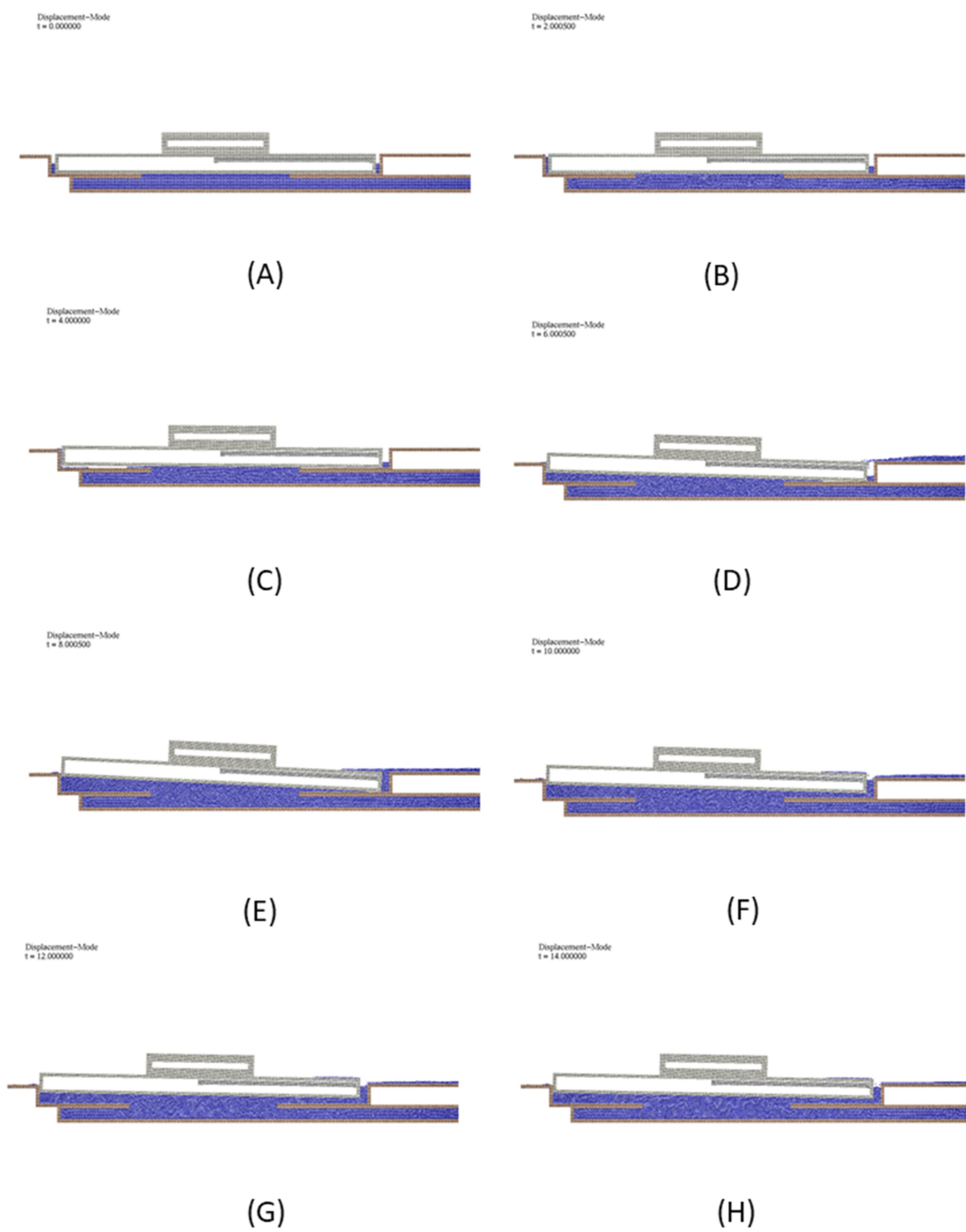


Fig. 4-14 Motion of a float (R_H)

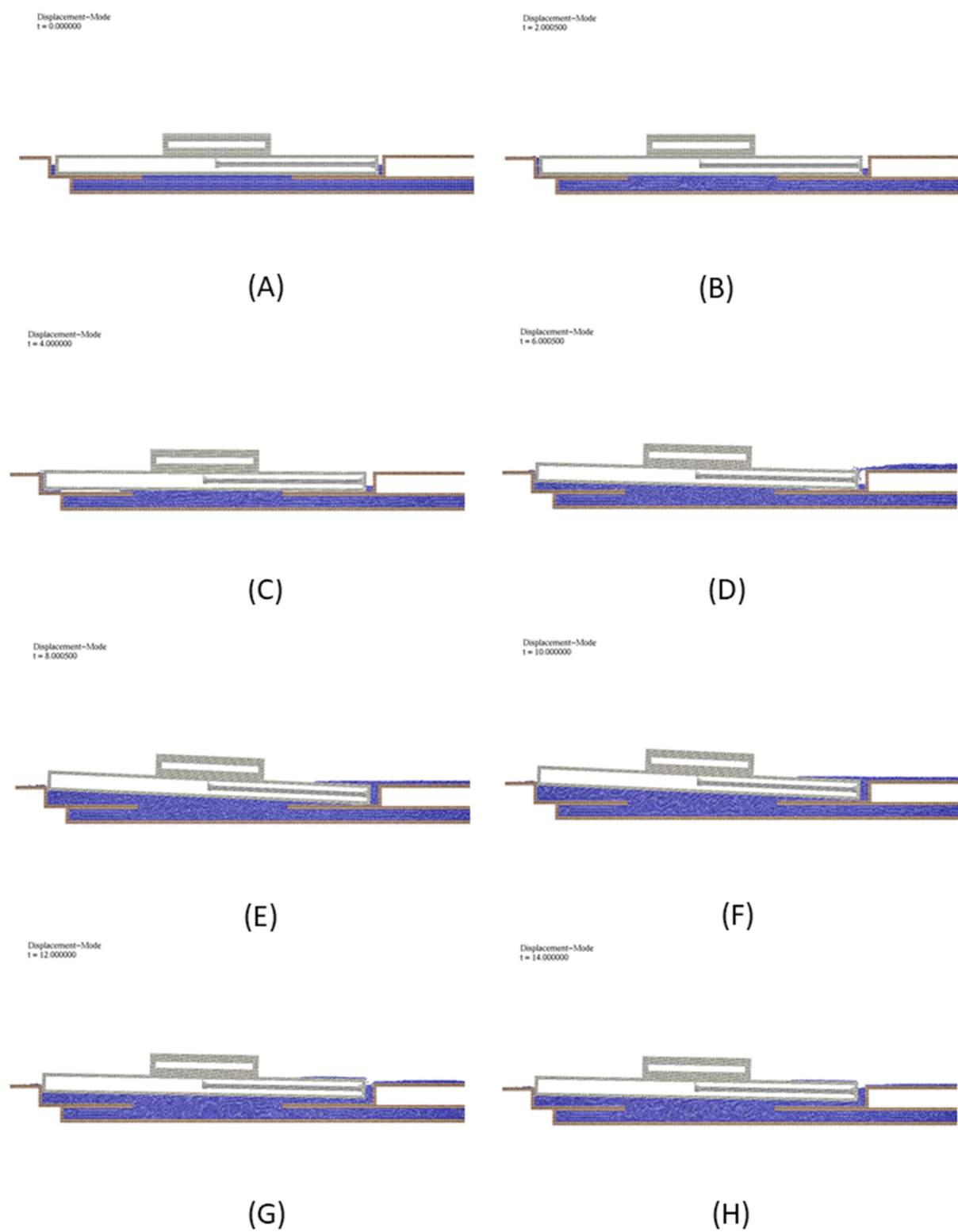


Fig. 4-15 Motion of a float (R_M)

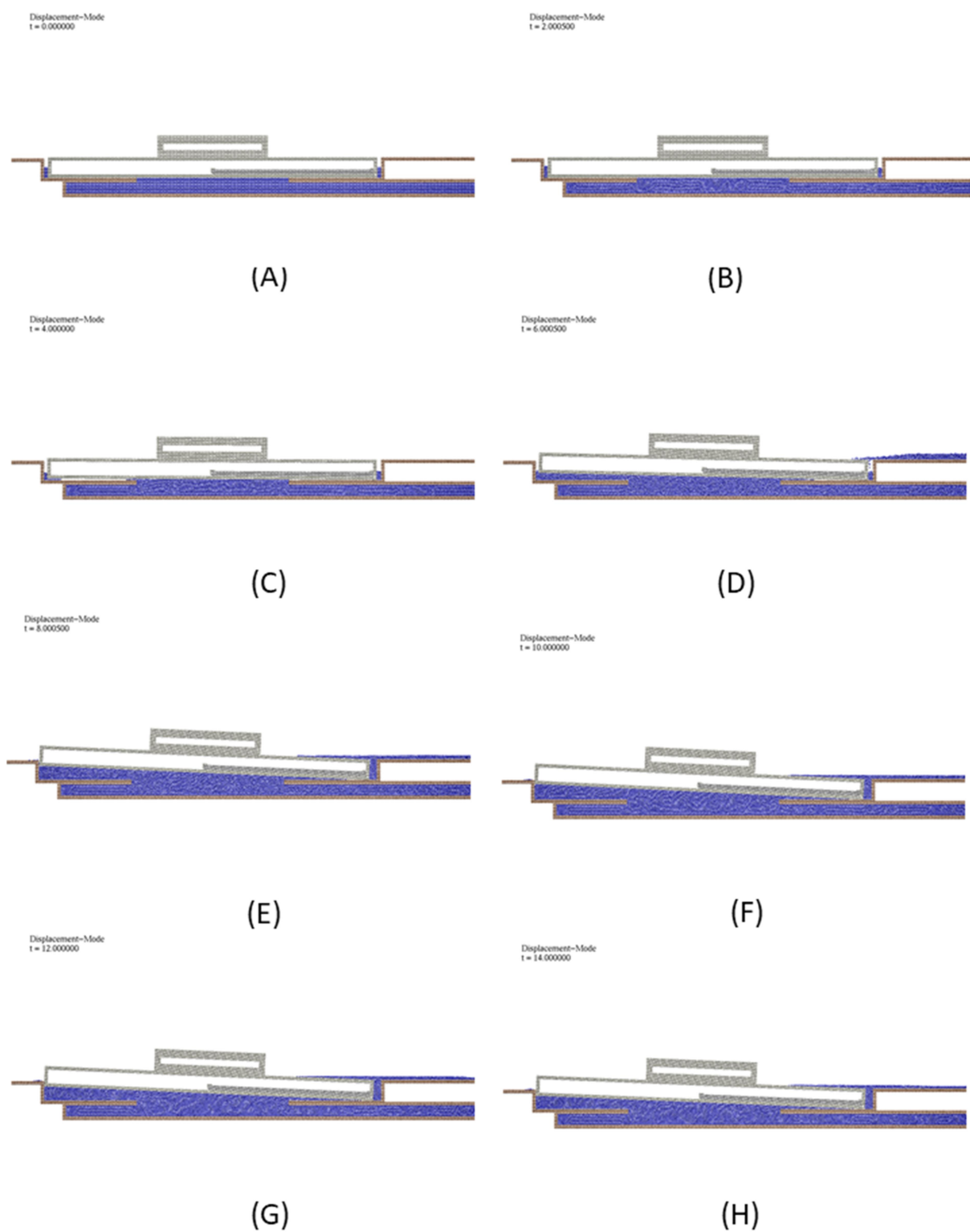


Fig. 4-16 Motion of a float (R_L)

4-2-1 重心の変化による浮体傾斜への影響

まず、重心の変化による浮体の傾斜への影響を結果グラフに示す。

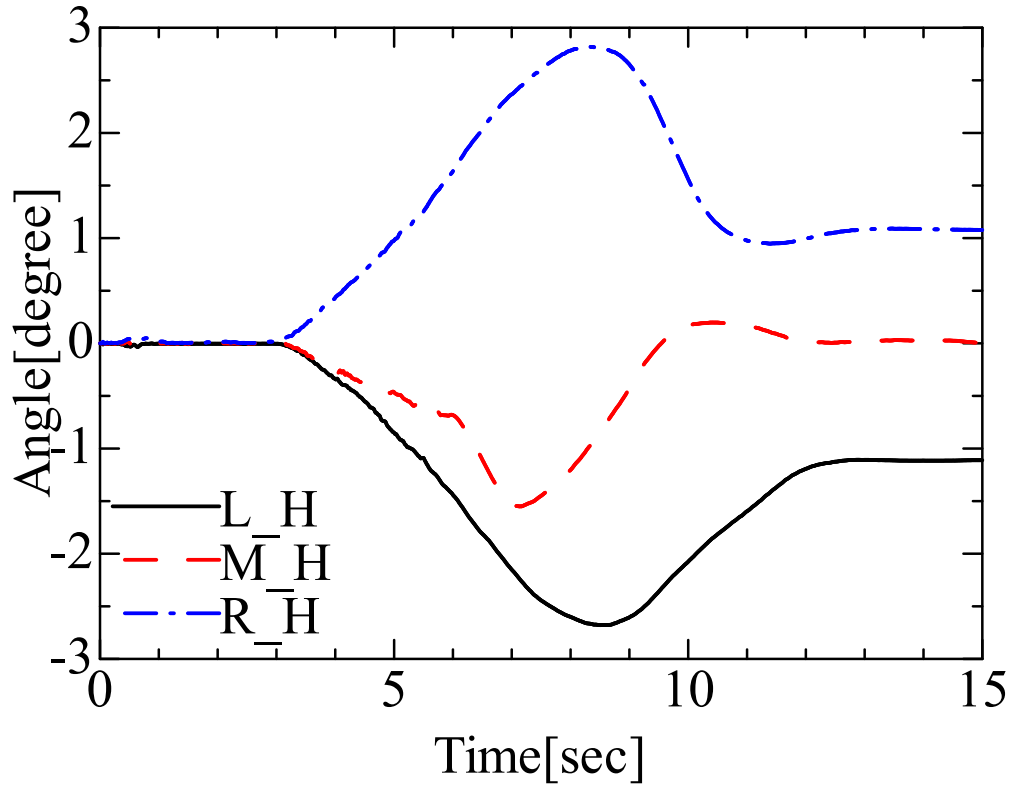


Fig. 4-17 Relationship between center of gravity and float inclination (high position)

Fig. 4 3 は重心位置が高いグループをプロットしたグラフだ。重心位置が津波に対して手前にあるか、奥にあるかで初期の傾き方向が変化している。傾きの最大値は、重心が浮体左寄りにある L_H で - 2. 68 度、重心が中央に位置する M_H で - 1. 54 度、重心が浮体右寄りにある R_H で 2. 82 度となった。重心が中央にある場合が最も安定していることが分かる。6sec 付近、M_H ではグラフの傾きが変化した。これは到達した津波の影響であると考えられる。他の二つの場合では、堀に到達した津波の影響よりも水管を通して導入された津波による影響のほうが大きく、傾きの変化として現れなかったと考えられる。また、L_H と R_H では、傾斜が最大に達してから安定になるまでの傾きが異なった。津波に対し奥に重心を持つ L_H のほうが緩やかに安定へ至っている。

Fig. 4 4 は高さ方向重心位置が中間に位置するグループをプロットしている。

最大傾きはそれぞれ, L_M で -2.65 度, M_M で -0.857 度, R_M で 2.74 度だった. M_M の場合で最も浮体の傾きが少ないと言える. また, M_M のグラフの特徴として, はっきりと目立つ頂点が他の二つのグラフに比べて多いことが挙げられる. 細かな揺れが起きていることを示しており, この運動による影響も考慮する必要があると考えられる. この細かなゆれは津波が堀に侵入する前に起きていることから, 水管から導入された津波の影響であることが分かる. L_M と R_M では重心の偏りが大きかったため, 揺れるような運動は発生しなかったと考えられる.

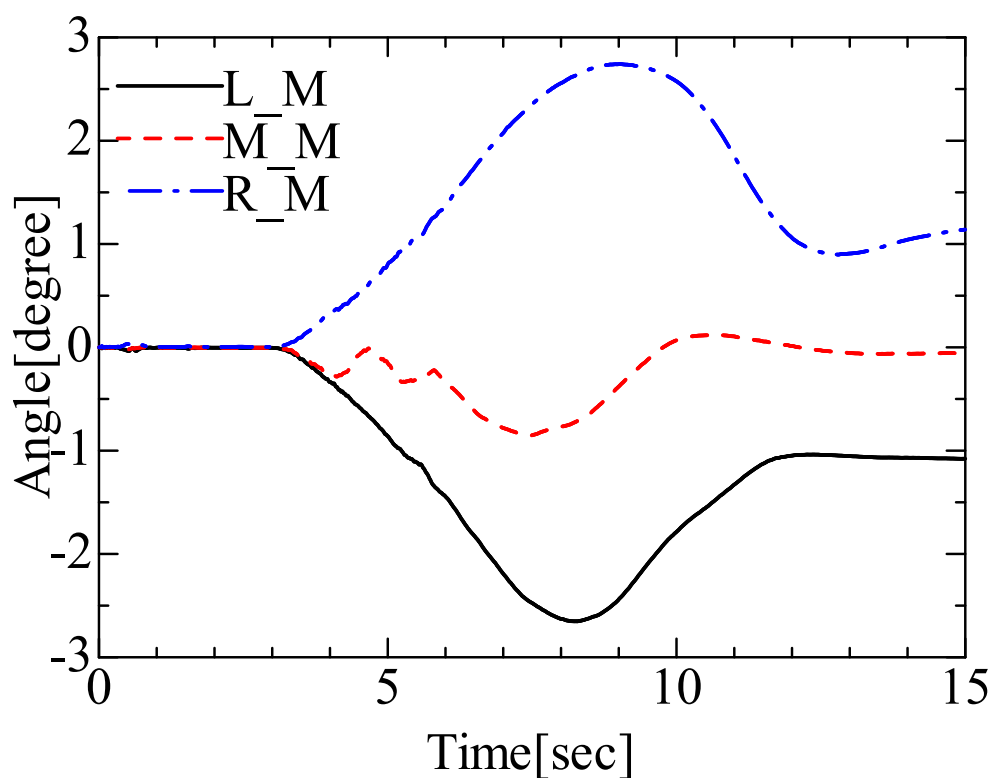


Fig. 4-18 Relationship between center of gravity and float inclination (middle position)

Fig. 4 5 は重心が浮体下部に位置するグループをまとめた結果グラフだ.

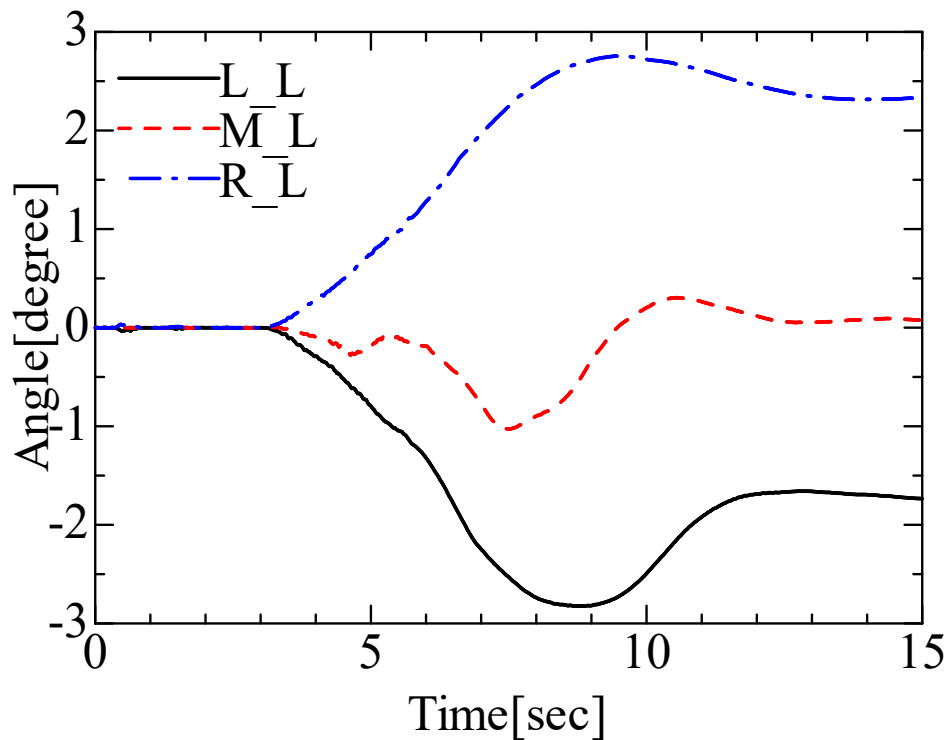


Fig. 4-19 Relationship between center of gravity and float inclination (low position)

L_L の最大傾きは-2.82 度, M_L の最大傾きは-1.03 度, R_L は 2.76 度であった. 最も傾きが小さかったのは重心が中央に位置する M_L だった. グラフが頂点に達するまで傾きの大きさや増え方で似た傾向を示している L_L と R_L だが, 最終傾きの大きさは L_L が-1.73 度, R_L が 2.33 度と大きく異なっている. 津波に対して手前に重心が位置することに起因すると考えられるが, この現象が MPS による数値計算に特有のものである可能性も考えられる. 模型実験を行って, 現実の物理現象との整合性を確かめる必要がある.

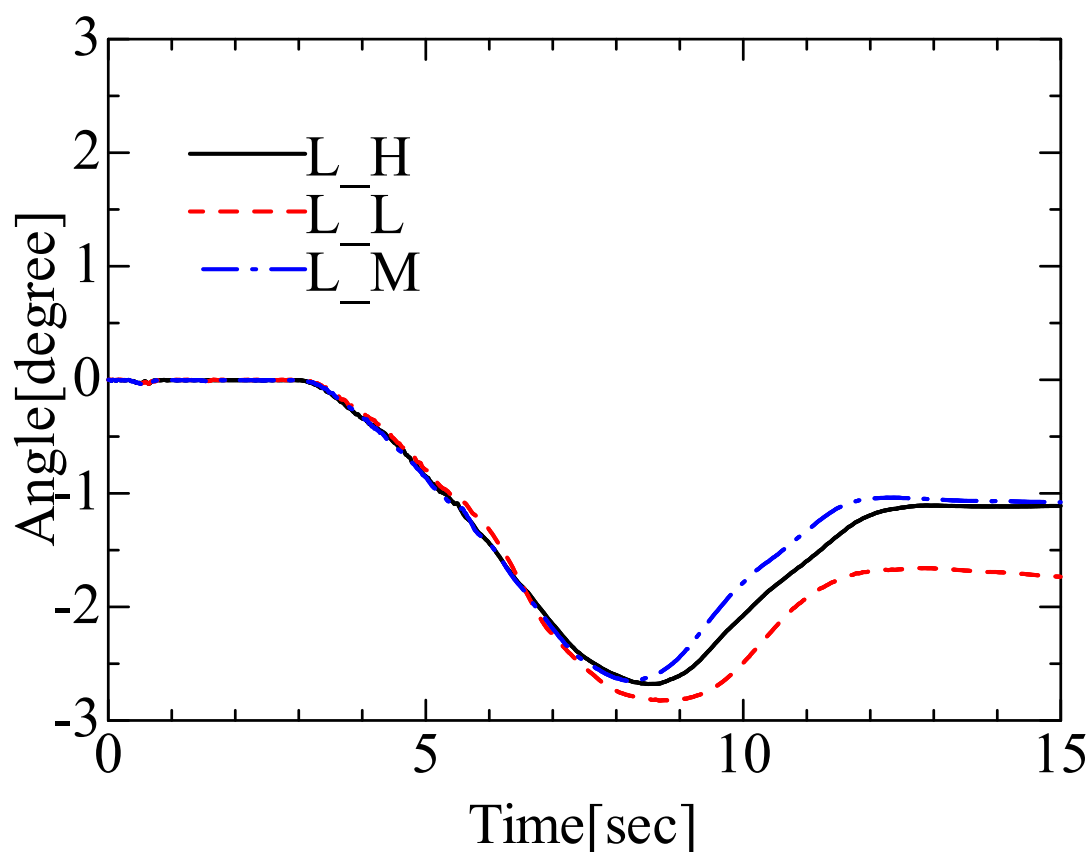


Fig. 4-20 Relationship between center of gravity and float inclination (left position)

Fig. 4 6は重心位置が浮体左側に位置するグループをまとめた結果グラフだ。8sec ころまで3つのグラフの傾きはほぼ一致している。最大傾き角度は重心が低い場所に位置する L_L でわずかに大きく、最終傾き角度も L_L が 1. 73 度で、他に比べ大となった。L_H の最終傾き角度は-1. 11 度、L_M で-1. 08 度であり、ほぼ一致している。最大、最終共に傾きの大きさからみると L_H と L_M に大きな差はないが、L_H のほうが最大傾きから最終傾きへの遷移タイミングが遅れていることが読み取れた。L_M に比べ傾き方向の変化が緩やかであり、浮体内部への影響について比較した時有利であると考えられる。

Fig. 4 7 は重心位置が浮体中央部にあるグループをまとめた結果グラフだ.

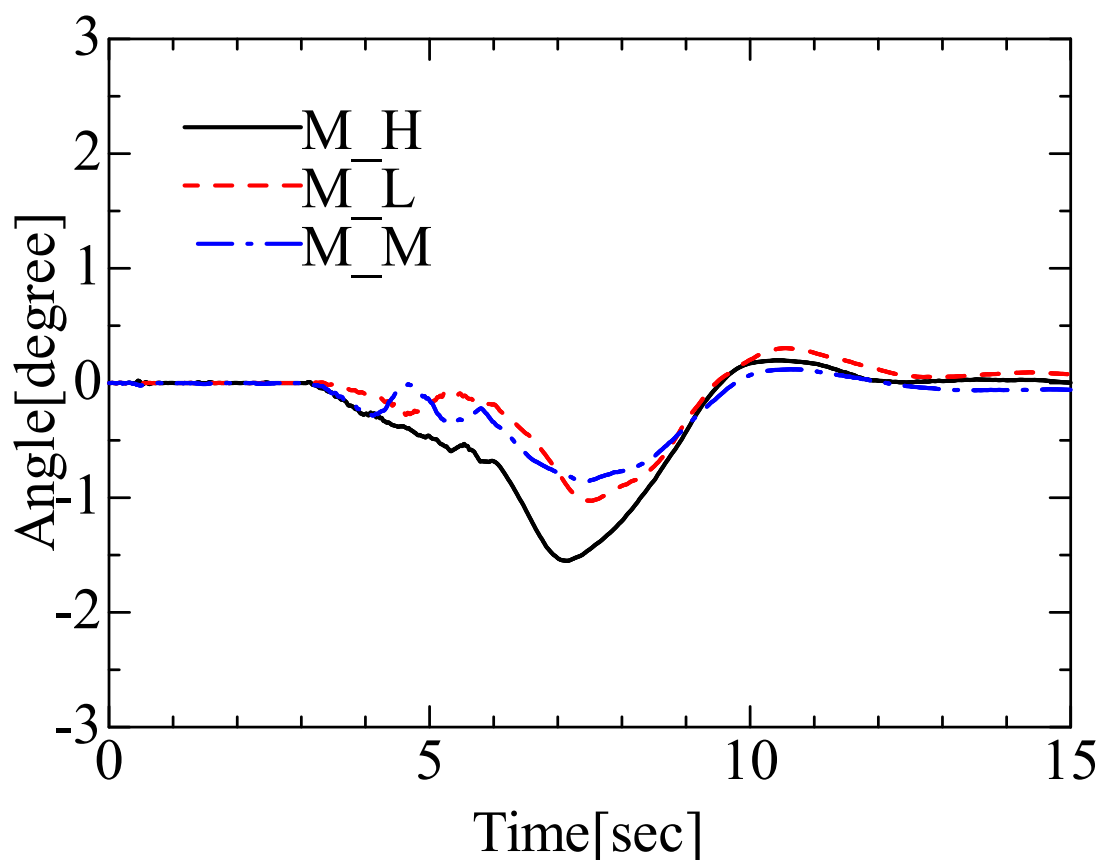


Fig. 4-21 Relationship between center of gravity and float inclination (center position)

浮体が傾き始めてから 9sec ごろまではグラフにばらつきがみられるが、以降はおおむね一致している。最も傾きが大きいのは M_H で -1.54 度、次に M_L の -1.03 度で、最も小さいのは M_M の -0.857 度である。津波が堀に到達する前、水管から導入された津波の影響を受けている段階では、M_H と M_L・M_M の間でグラフの形に違いがみられる。M_L と M_M は波型のグラフをしているのに対し、M_H は直線的なグラフになっている。これは重心の高さと初期の傾きを拡大する作用を持つ慣性モーメントの関係を示すと考えられる。M_H と M_M ではグラフの立ち上がりが一致しているが、M_M のみ約 0.5sec 後に傾きが反転していることから、この関係を観察することができる。

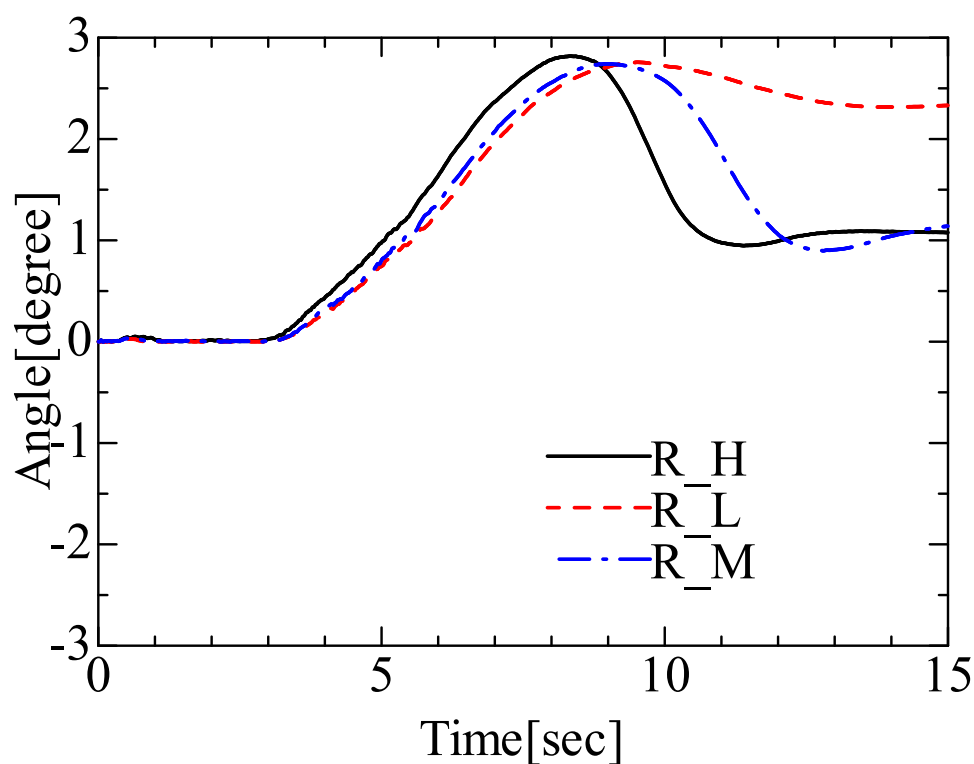


Fig. 4-22 Relationship between center of gravity and float inclination (right position)

Fig. 4 8 は重心が浮体右側に位置するグループをプロットした結果グラフである。それぞれ最大傾き角度に達するまでの時間は、 R_H がわずかに他の 2 つに比べ早いものの、おおむね一致している。 R_H と R_M はグラフの形状が似ているが、 R_H のグラフの方が傾きが大きく、浮体傾きの変化が急であることが読み取れた。 R_L は最終傾き角度が大きく異なる結果となっている。これは浮体全体の重心と関係があると考えられる。ここで変化させているバラストの重心は浮体全体から見ると下方に位置しているため、バラストの重心位置が浮体全体の中央に近づく R_H と R_M で傾きへの影響が減少したのではないだろうか。

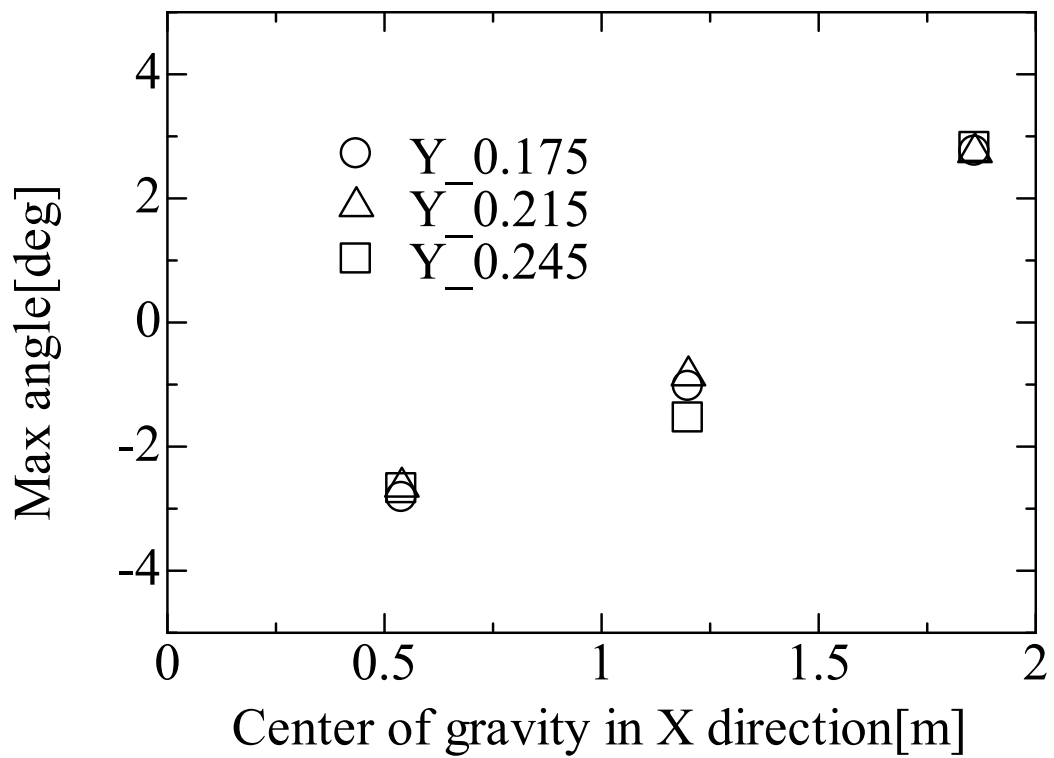


Fig. 4-23 Relationship between center of gravity and floating body angle

Fig. 4-9 は、重心の位置と最大傾き角度の関係を重心の高さ別に同じ記号でまとめてプロットしたグラフだ。このグラフを見ると、X 方向の重心位置が浮体中央に近いほど、Y 方向の重心の変化による影響を受けやすいことが読み取れる。これは慣性モーメントの影響であると考えられる。

Table 13 には重心位置ごとの最大傾き角度をまとめた。

Table 14 Center of gravity and maximum angle

		y		
		0.175	0.215	0.245
x	0. 54	-2.82 度	-2.65 度	-2.68 度
	1. 2	-1.03 度	-0.857 度	-1.54 度
	1. 86	2.76 度	2.74 度	2.82 度

4-2-2 重心位置と浮体高度の関係

Table 14, Table 15, Table 16 に最大浮体高さと 15sec 時点の最終浮体高さを示した.

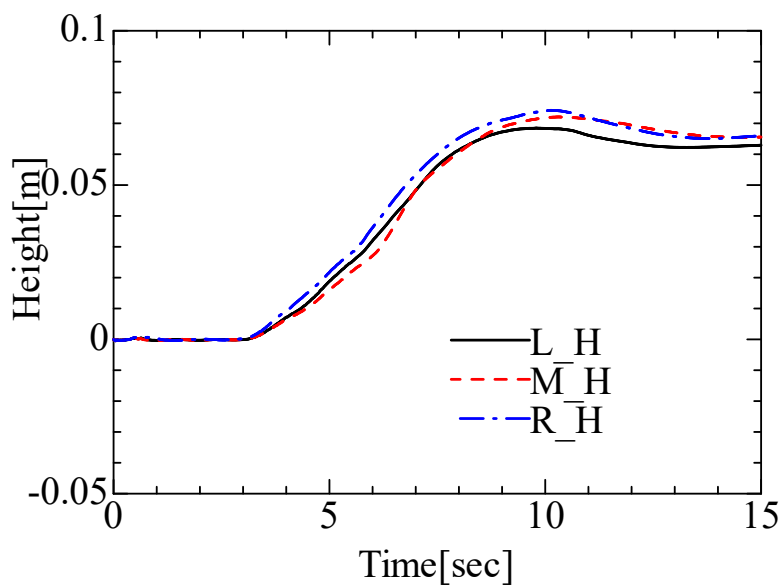


Fig. 4-24 Relationship between center of gravity and height of floating body (high position)

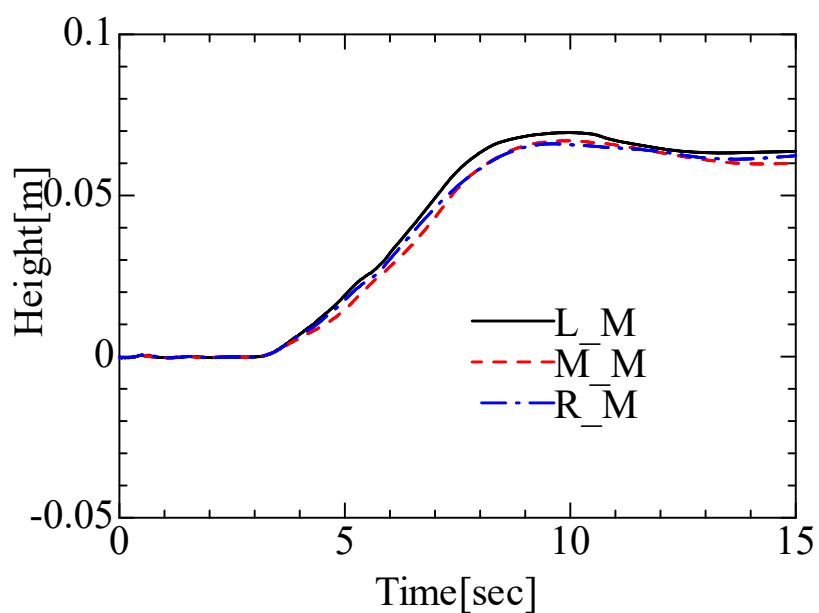


Fig. 4-25 Relationship between center of gravity and height of floating body (middle position)

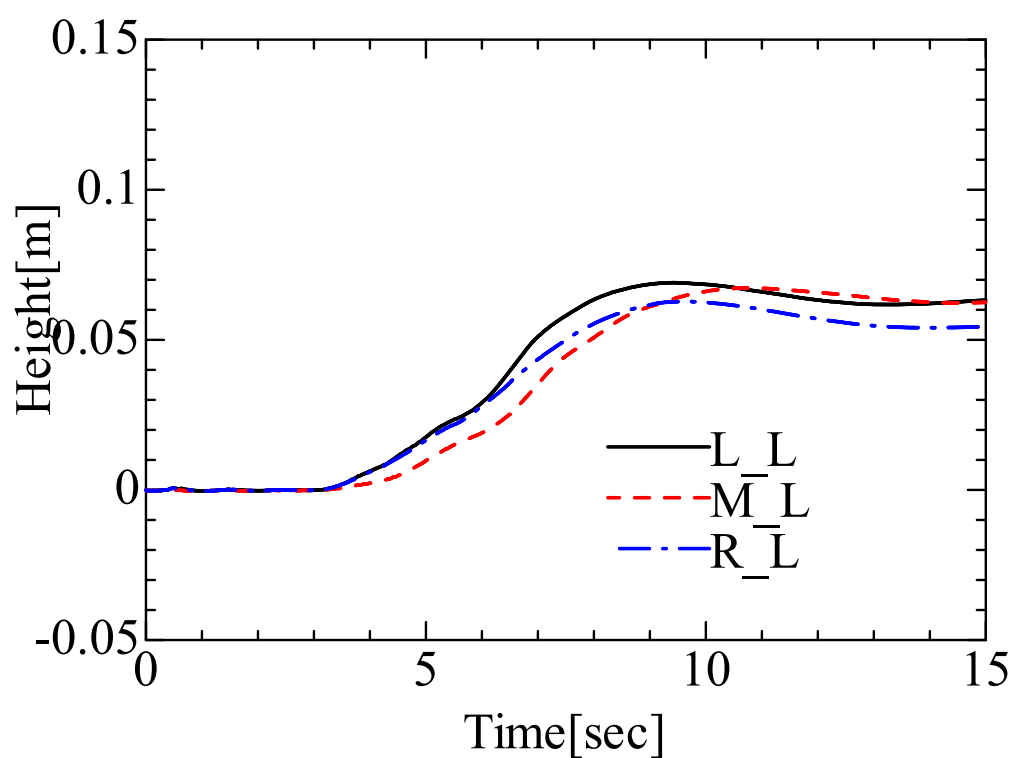


Fig. 4-26 Relationship between center of gravity and height of floating body (low position)

Table 15 Maximum floating height and final floating height (high position)

	最大浮体高さ	最終浮体高さ
L_H	$6.85 \times 10^{-2} \text{m}$	$6.29 \times 10^{-2} \text{m}$
M_H	$7.21 \times 10^{-2} \text{m}$	$6.56 \times 10^{-2} \text{m}$
R_H	$7.42 \times 10^{-2} \text{m}$	$6.60 \times 10^{-2} \text{m}$

Table 16 Maximum float height and final float resistance (middle position)

	最大浮体高さ	最終浮体高さ
L_M	$6.94 \times 10^{-2} \text{m}$	$6.37 \times 10^{-2} \text{m}$
M_M	$6.70 \times 10^{-2} \text{m}$	$6.00 \times 10^{-2} \text{m}$
R_M	$6.60 \times 10^{-2} \text{m}$	$6.24 \times 10^{-2} \text{m}$

Table 17 Maximum float height and final float resistance (low position)

	最大浮体高さ	最終浮体高さ
L_L	$6.90 \times 10^{-2} \text{m}$	$6.32 \times 10^{-2} \text{m}$
M_L	$6.72 \times 10^{-2} \text{m}$	$6.25 \times 10^{-2} \text{m}$
R_L	$6.28 \times 10^{-2} \text{m}$	$5.44 \times 10^{-2} \text{m}$

まず重心位置が高いグループの浮体高度についてプロットした Fig. 4 10 について、3つのグラフの立ち上がりは一致しており、重心位置が高い場合には X 方向の重心変化が浮上しやすさに及ぼす影響は少ないと言える。R_H が全体的に他の場合に比べ高い位置にある傾向だが、これは傾きが大きい中心点が高くなっているためだと考えられる。先述した通り単に傾きの大きさだけでいえば L_H も大きな差はないが、津波に対して手前側に重心が位置していることが影響していることが、わずかな浮体高度の差につながっていると考えられる。

Fig. 4 11 は高さ方向の重心が中間に位置するグループをプロットしたグラフである。グラフの外形はよく一致していることが読み取れる。わずかに L_M の最大浮体高さが大きくなっているのは、浮体の傾きが影響していると考えられる。

重心位置が低いグループをプロットした Fig. 4 12 についても、立ち上がりは一致しておりグラフ概形は一致していると言える。グラフのばらつきは他の 2 つのグラフに比べ大きく、重心位置の低さが影響していると考えられる。

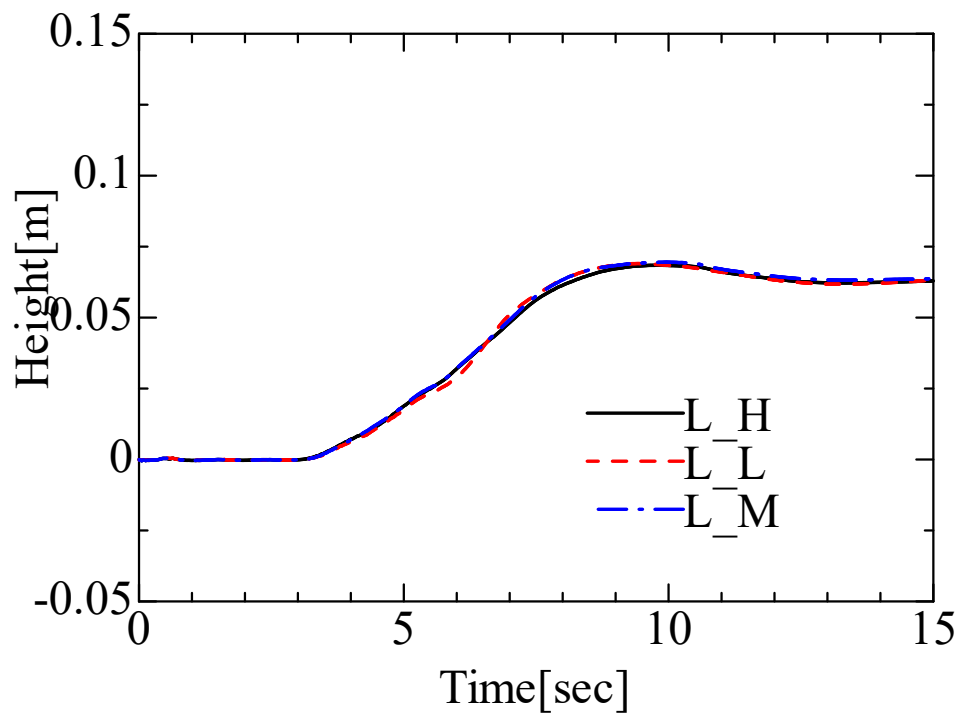


Fig. 4-27 Relationship between center of gravity and height of floating body (left position)

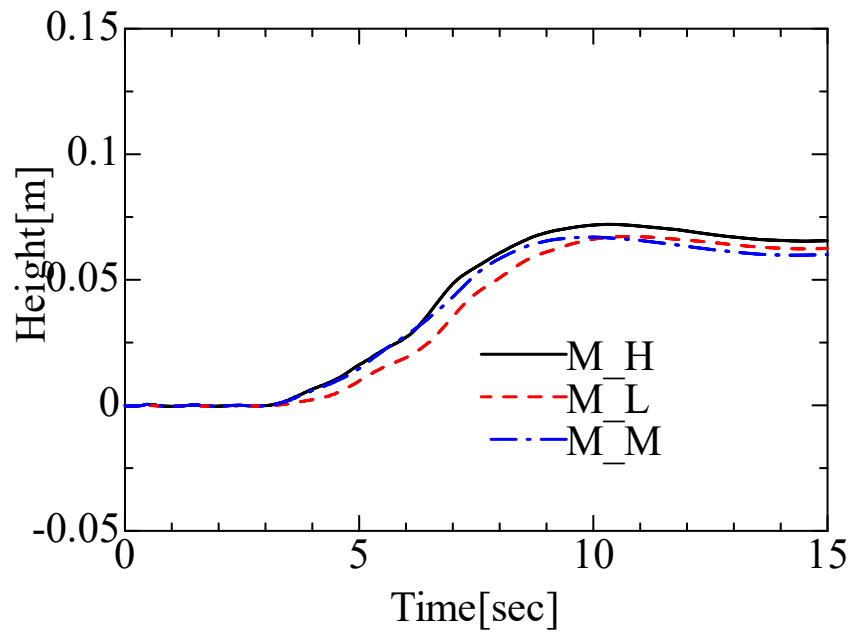


Fig. 4-28 Relationship between center of gravity and height of floating body (center position)

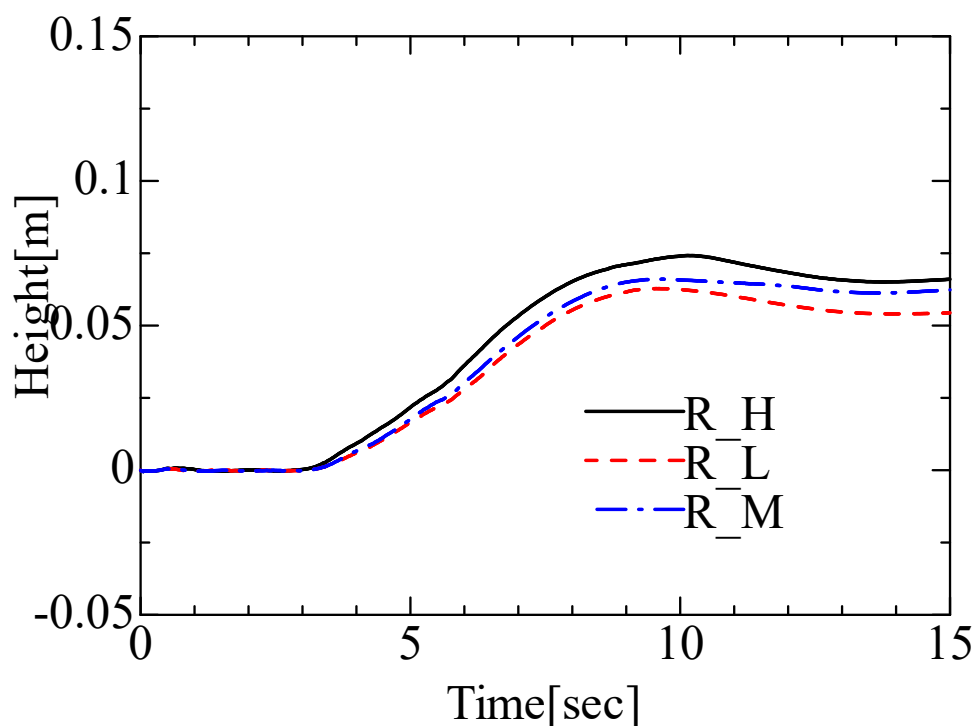


Fig. 4-29 Relationship between center of gravity and height of floating body (right position)

Fig. 4 13 は重心が浮体左に位置するグループをプロットしたグラフだ。Y 方向の重心位置に関わらずグラフが一致していることが分かる。重心が津波に対して奥に位置していることで、堀に流入した津波の影響を受けにくかったと考えられる。次に Fig. 4 14 は重心が浮体中央に位置するグループである。わずかにグラフがばらついており、M_H と M_L が乖離したタイミングから、Y 方向の重心の違いによって堀に流入した津波の影響を受けていることが分かる。3 枚目の Fig. 4 15 は重心が浮体の右側、津波に対して手前に位置しているグループをプロットしたグラフだ。3 枚の中で最もばらつきが大きい結果となった。ただし、2 枚目、3 枚目共にばらつきは粒子 1~2 個分程度と微量であることから、計算方法による誤差も含めた検討が必要である。

第5章 結論と今後の課題

本研究から以下の知見を得ることができた．

1. 地中に水管を通して津波を導入し，噴出口を通して浮体浮上の補助とする手法について，有効であることが確かめられた．噴出口の幅によっても浮体の運動に変化がみられる
2. 重心の変化が大型浮体式津波シェルターの耐津波特性に及ぼす影響について，MPS 法で捉えることができた．
3. 想定される津波に対して，重心をコントロールすることで動揺を最小限に抑えることが可能であると考えられる．

大型浮体式津波シェルターはできるだけ多くの人々が安全に避難できるようにデザインする必要がある．このことから本研究では，避難のボトルネックとなりうる橋や幅の広い堀を避けている．狭い堀では浮体が浮上しにくいため，地中から水管を利用して津波を導入する手法を想定した．この手法について MPS 法で有効性は確かめられたが，今後模型を用いた水理実験でも有効性を確かめる必要がある．

本研究で得られた知見から，施設の利用法に応じた耐津波特性についてシミュレーションを利用してデザインすることができると考えられる．耐津波特性に加え，耐震性の検討や避難時の人の流れの検討を進めることによって，より実践的な大型浮体式津波シェルターの設計が可能になるだろう．

二つの数値シミュレーションに共通する事項として，2D では表現できなかった津波の回り込みや，モデル地域で想定される 2 方向からの津波など，3 次元的な現象について確かめる必要がある．

謝辞

本論文を執筆するにあたり、ご指導とご支援をいただいた皆様に感謝申し上げます。

主指導である南清和先生には、研究指導のみならず学生生活についても親身に相談に乗っていただきました。発達障害によって何かと困難を抱えがちであった自分が論文を書き上げられたのは、南先生のご指導あつてのものです。この場を借りて深く感謝申し上げます。

副指導である増田光弘先生には、数値シミュレーションを進めるにあたって多大なご指導とご助言をいただきました。数値計算工学に明るくなかった自分にとって大変良い経験となり、論文を仕上げることができました。深く感謝申し上げます。

そして、学生生活を支えてくださった両親と家族に心からの感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 藤井敏嗣、瀬瀬一起，地震・津波と火山の事典，丸善株式会社，2008.3.
- [2] 警察庁，“東日本大震災と警察，” 焦点第 281 号，2012 年 4 月 25 日.
- [3] 復興庁，“全国の避難者の数（所在都道府県別・所在施設別の数）避難者の数[令和 2 年 2 月 28 日],” 2020.2.28.
- [4] 復興庁，“東日本大震災における震災関連死の死者数（令和元年 9 月 30 日現在），” 27 12 令和元.
- [5] 内閣府，“平成 23 年度版防災白書，” 2012.
- [6] 河北新報，河北新報特別縮刷版 3・11 東日本大震災一カ月の記録，竹書房，2011.
- [7] 農林水産政策研究所，“震災対応特別プロジェクト 第 1 号 過去の復興事例等の分析による東日本大震災復興への示唆～農漁業の再編と集落コミュニティの再生に向けて～（2012 年 9 月），” 2012.
- [8] 田中舘秀三，山口彌一郎，“三陸地方の津浪に依る聚落移動，” 01 09 1938. [オンライン]. Available: <http://tsunami-dl.jp/document/142#section-9b295cdd1818b82ebb1610ab9fcccb10>. [アクセス日: 25 07 2020].
- [9] 濱田政則，耐津波学，森北出版，2015.10.
- [10] 橋本洋佑，“MPS 法による浮体式災害時医療支援システムの，” 2015.
- [11] 岸拓真，“博士学位論文浮体式大型津波シェルターの設計に関する研究，” 2018.
- [12] 川崎愛，“修士学位論文 浮体式津波シェルターに関する研究，” 2013.
- [13] 増田光弘，“2 次元 MPS 法による岸壁近傍に設置された浮体式構造物の津波中挙動解析に関する研究，” 日本船舶海洋工学会論文集 第 9 号，2009.
- [14] 国土交通省，“津波防災地域づくり推進計画作成ガイドライン，” 2018.4.
- [15] 総務省 統計局統計調査部国勢統計課，“平成 27 年国勢調査，” 22 05 2020. [オンライン]. Available: https://www.e-stat.go.jp/stat-search/database?page=1&layout=datalist&toukei=00200521&tstat=000001080615&cycle=0&tclass1=000001089055&result_page=1. [アクセス日: 06 08 2020].
- [16] 和歌山県白浜町，“白浜町津波ハザードマップ，” 01 03 2016. [オンライン]. Available: <http://www.town.shirahama.wakayama.jp/soshiki/somu/kiki/gyomu/sonaete/1450338319282.html>. [アクセス日: 06 08 2020].
- [17] 紀伊民報，“津波に備え救命艇設置 避難困難の白浜町富田川口，” 13 05 2019. [オンライン]. Available: <https://www.agara.co.jp/article/7212>. [アクセス日: 01 08 2020].
- [18] 国土交通省，“建築構造設計基準の資料，” 平成 30 年.
- [19] 国土交通省 水管理・国土保全局 水資源部，“日本の水資源の現況，” 令和元年.

- [20] 一般社団法人 日本ビルエネルギー総合管理技術協会, “建築物エネルギー消費量調査 40 報 (ダイジェスト版),” 平成 30 年度.
- [21] (社) 日本造船学会海洋工学委員会 構造部会, 超大型浮体構造物の構造設計, 成山堂, 2004.
- [22] (社) 日本造船学会 海洋工学委員会 性能部会, 超大型浮体構造物, 成山堂, 1995.
- [23] 鹿島建設 土木設計本部, 海洋・港湾構造物, 鹿島出版会, 2003.9.10.
- [24] 野原威男・庄司邦昭, 航海造船学, 海文堂, 2012.
- [25] 国土交通省 国土技術政策総合研究所, “災害拠点建築物の設計ガイドライン (案),” 国土技術政策総合研究所, 2008.1.
- [26] 国土交通省, “津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について,” 17 11 2011. [オンライン]. Available: https://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000274.html. [アクセス日: 25 07 2020].
- [27] 国土交通省 国土技術政策総合研究所, “津波避難ビル等の構造上の要件の解説,” 国土技術政策総合研究所, 2012.3.
- [28] 国土交通省 防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン検討委員会, “防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドラインに関連する既往指針等の概要,” 2019.6.7.
- [29] 奥. 敏. 晴. 山内 泰之, 鉄骨造建築物の耐震設計, 東京都: 工業調査会, 1999.
- [30] (社) 日本造船学会 海洋工学委員会性能部会, 実践 浮体の流体力学 後編-実験と解析, 成山堂, 2003.
- [31] 越塚誠一, 数値流体力学, 培風館, 1997.4.18.
- [32] 越塚誠一, 粒子法, 丸善出版株式会社, 2005.2.25.
- [33] 地盤工学会, 地盤・耐震工学入門, 社団法人地盤工学会, 2008.7.
- [34] 国土交通省, “建築構造設計基準,” 平成 30 年制定.
- [35] 海洋建築研究会, 海洋空間を拓く メガフロートから海上都市へ, 成山堂書店, 2017.3.28.